

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPA A PARTIR DEL RAQUIS DE LA
PALMA AFRICANA MEDIANTE LOS PROCESOS
DE SODA Y SODA-ANTRAQUINONA

SANDRA MILENA RIOS MALDONADO

STELLA VESGA RUEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA
Julio de 2008

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPA A PARTIR DEL RAQUIS DE LA
PALMA AFRICANA MEDIANTE LOS PROCESOS
DE SODA Y SODA-ANTRAQUINONA

SANDRA MILENA RIOS MALDONADO
STELLA VESGA RUEDA

Trabajo de grado para optar al título de Químico.

Directora
LUZ AMPARO LOZANO
Química Ms. C.

Codirector
GUILLERMO GONZÁLEZ
Químico Ms. C.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA
Julio de 2008

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DE ARTE	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 MATERIA PRIMA	3
1.2.1 Palma africana	3
1.3 ESTRUCTURA DE LOS VEGETALES	9
1.4 PROCESO DE OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPAS	13
1.4.1 Etapa Química.	14
1.4.2 Etapa Mecánica.	15
1.4.3 Blanqueo.	16
1.4.4 Propiedades físico-mecánicas de la pulpa.	22
1.5 COMPORTAMIENTO QUÍMICO	27
1.6 DESEMPEÑO DE LA ANTRAQUINONA	33
2. MATERIALES Y METODOLOGÍA	39
2.1 GENERALIDADES	39
2.2 PREPARACIÓN DEL MATERIAL	39
2.3 DIGESTIONES	42
2.4 DESFIBRADO	44
2.5 REFINO	44
2.6 BLANQUEO	45
2.7 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	48
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1 ANÁLISIS QUÍMICO	50
3.2 DIGESTIONES	51
3.3 PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS	53

3.3.1 Propiedades físico-mecánicas de pulpas para papel	53
3.3.2 Propiedades físico-mecánicas de pulpas para inserción en cartón corrugado	55
3.3.3 Análisis del efecto de tratamiento químico y físico sobre las propiedades físico-mecánicas	57
3.4 BLANQUEO	60
4. CONCLUSIONES	64
5. RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Palma Africana.	4
Figura 2. Hoja de la palma de aceite.	6
Figura 3. Composición química de los vegetales.	9
Figura 4. Condensación de la glucosa.	9
Figura 5. Organización del esqueleto de celulosa en la pared de la fibra.	10
Figura 6. Unidades estructurales de las hemicelulosas.	11
Figura 7. Alcoholes precursores de la lignina.	12
Figura 8. Reacción del hipoclorito con las unidades estructurales de la lignina.	18
Figura 9. Reacción de Dakin: ataque del peróxido de hidrógeno sobre la lignina.	20
Figura 10. División del enlace glicosídico durante el blanqueo alcalino O_2/H_2O_2 .	20
Figura 11. Ataque del peroxianión sobre la o-quinona.	21
Figura 12. Reacción de acortamiento de polisacáridos durante el blanqueo O_2/H_2O_2 .	21
Figura 13. Componentes del cartón corrugado.	25
Figura 14. Degradación de la celulosa en medio alcalino.	29
Figura 15. Estabilidad de la celulosa en medio alcalino.	30
Figura 16. Ruptura de los enlaces β -O-4 en la lignina.	31
Figura 17. Formación del intermediario metilenquinona	32
Figura 18. Formación del enlace α -5.	32
Figura 19. Estados de oxidación de la antraquinona.	34
Figura 20. Ciclo redox de la antraquinona.	35

Figura 21. Mecanismo SET de la antraquinona.	37
Figura 22. Diagrama general de la metodología experimental.	49

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Normas empleadas en el análisis químico.	42
Tabla 2. Procesos a la soda.	43
Tabla 3. Procesos a la soda- AQ.	44
Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas.	45
Tabla 5. Condiciones de blanqueo para ensayos.	46
Tabla 6. Condiciones definitivas de blanqueo.	47

LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO A. Composición química	74
Tabla A-1. Composición química del raquis de palma africana	74
Tabla A-2. Comparación de la composición con otras materias primas.	75
ANEXO B. Resultados de las digestiones	76
Tabla B-1. Temperatura 150°C, tiempo a temperatura máxima de 120 y 150 minutos	76
Tabla B-2. Temperatura 160°C, tiempo a temperatura máxima de 120 y 150 minutos	76
ANEXO C. Influencia de la antraquinona sobre el grado de deslignificación	77
Figura C-1. Gráficas del comportamiento del grado de deslignificación frente al porcentaje de antraquinona	77
ANEXO D. Propiedades de resistencia de pulpa para papel	78
ANEXO D-1. Temperatura máxima de 150°C y tiempo de digestión de 120 minutos	78
ANEXO D-2. Temperatura máxima de 150°C y tiempo de digestión de 150 minutos	79
ANEXO D-3. Temperatura máxima de 160°C y tiempo de digestión de 120 minutos	80
ANEXO D-4. Temperatura máxima de 160°C y tiempo de digestión de 150 minutos	81
ANEXO E. Influencia del refino sobre las propiedades de resistencia de pulpa para papel	82
Figura E-1. Gráficas del índice de rasgado frente al grado de refino	82
Figura E-2. Gráficas del índice de explosión frente al grado de refino	83
Figura E-3. Gráficas del índice de tensión frente al grado de refino	84

Figura E-4. Gráficas de dobles dobleces frente al grado de refino	85
ANEXO F. Propiedades de resistencia de pulpa para liners y ondulado medio para cartón	86
Tabla F-1. Temperatura máxima de 150°C y tiempo de digestión de 120 minutos	86
Tabla F-2. Temperatura máxima de 150°C y tiempo de digestión de 150 minutos	87
Tabla F-3. Temperatura máxima de 160°C y tiempo de digestión de 120 minutos	88
Tabla F-4. Temperatura máxima de 160°C y tiempo de digestión de 150 minutos	89
ANEXO G. Influencia del refino sobre las propiedades de resistencia de pulpas para cartón	90
Figura G-1. Gráficas de CMT frente al grado de refino	90
Figura G-2. Gráficas de CLT frente al grado de refino	91
Figura G-3. Gráficas de CFC frente al grado de refino	92
Figura G-4. Gráficas de RCT frente al grado de refino	93
ANEXO H. Comparación de propiedades de resistencia de pulpas para papel entre diferentes materiales fibrosos	94
Tabla H-1. Propiedades físico-mecánicas de materiales expuestos al proceso de soda-AQ	94
ANEXO I. Resultados del tratamiento de blanqueo	95
Tabla I-1. Parámetros de seguimiento de las etapas de blanqueo.	95
Tabla I-2. Resultados del proceso de blanqueo de la pulpa morena	96
Tabla I-3. Influencia del proceso de blanqueo sobre las propiedades físico- mecánicas	96
Tabla I-4. Pérdida de blancura por envejecimiento	97
Figura I-5. Pérdida de blancura frente al tiempo de envejecimiento	97

ANEXO J. Normas adicionales aplicadas en los procesos de preparación y evaluación de pulpas.	98
Tabla J-1. Normas complementarias	98
ANEXO K. Glosario	99
ANEXO L. Equipos empleados	103
Figura L-1. Sprout Waldron	103
Figura L-2. Holandesa Valley	103
Figura L-3. Micrómetro	104
Figura L-4. Medidor de la resistencia a la explosión Mullen Tester	104
Figura L-5. Probador Elmendorf Tearing Tester	105
Figura L-6. Tensiómetro TMI	105
Figura L-7. El repho	106
Figura L-8. Concora médium tester	106
Figura L-9. Probador folding endurance tester	107
ANEXO M. Estabilidad de la blancura de la pulpa por exposición a un envejecimiento acelerado a 105°C	108
Figura M-1. Prueba de envejecimiento	108

LISTA DE ABREVIATURAS

AQ. Antraquinona

bms. Base material seco

CICELPA. Grupo de investigación en celulosa, pulpa y papel.

CLT. Compresión lateral

CMT. Compresión del ondulado o Concora

CSF. Canadian Standard Frenes

DTPA. Ácido dietilentriaminopentacético

FCT. Compresión en plano del cartón ondulado

HAQ. Hidroantraquinona.

HEHP. Secuencia de blanqueo: hipoclorito, extracción alcalina, hipoclorito, peróxido.

RCT. Ring Crush Test

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper International.

UNE. Unificación de las Normas Españolas

Title: SODA AND SODA-ANTHRAQUINONE PULPING OF AFRICAN PALM RACHIS: EVALUATION OF THE OBTAINED PULPS*

Authors

STELLA VESGA RUEDA

SANDRA MILENA RÍOS MALDONADO**

Keywords: soda-anthraquinone pulping, delignification, physical and chemical properties, bleaching, african palm, paperboard.

ABSTRACT

To determine its effectiveness to produce pulps for the production of paper, liner and fluting media, fibrous material of African Palm Rachis, residues from the periodic pruning of plantations of "Palmas del Cesar" (situated in San Alberto), was evaluated by soda and soda-anthraquinone pulping.

The present work aimed to investigate the influence of the anthraquinone and its cooking parameters: maximum temperature and time at maximum temperature on pulp yield, delignification level and pulp quality. Twelve cooking processes were carried out combining the variables with a soda concentration of 15% (dry solid basis), liquor to fibers ration of 8,5:1, oven-dried non-wood fiber of 600g and time to maximum temperature of 60 minutes. The pulp yields obtained were from 58,1% to 64,3%.

The resulting pulps were defibrated and refined. The obtained pulps were converted into hand sheets of three different refining levels: 500 CSF, 400 CSF and 300 CSF. The 60 g/m² (paper sheets) and 135 g/m² (corrugated board sheets) were tested for their physic-mechanical properties. The soda-AQ pulping of palm rachis at a higher cooking temperature (160°C), time at maximum temperature (90min) and 0.1% AQ gave acceptable yield (58,1%) with good paper and board properties. Such fibers might be a potential substitute of wood and they would be used in blends with others fibers for recycled materials.

This study also involves the evaluation of the bleaching of soda-AQ pulp as the result of the 11th cooking, wich was treated (evaluated) in a HEHP sequence; based on the results of three pretrials and some literature reports, the most favourable conditions were selected for each stage of bleaching. The bleached pulp showed low strength properties, which might be attributed to some cellulose degradation during bleaching treatment.

*Thesis

** . Faculty of Sciences. School of Chemistry. Director, Luz Amparo Lozano Urbina; Codirector, Guillermo González Sierra.

TÍTULO: OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPA A PARTIR DEL RAQUIS DE LA PALMA AFRICANA MEDIANTE LOS PROCESOS DE SODA Y SODA-ANTRAQUINONA*

AUTORES

STELLA VESGA RUEDA

SANDRA MILENA RÍOS MALDONADO**

PALABRAS CLAVE: pulpeo soda-antraquinona, deslignificación, propiedades físico-mecánicas, blanqueo, palma africana, cartón.

RESUMEN.

El material fibroso del raquis de la palma africana, desecho de la poda periódica de las plantaciones de la empresa Palmas del Cesar (San Alberto), fue evaluado mediante los procesos soda y soda- AQ, con el fin de determinar su aptitud para producir pulpas tanto para papel como para liners y corrugado medio para cartón.

Se estudió la influencia de la antraquinona y los parámetros de digestión temperatura máxima y tiempo total, sobre el rendimiento, grado de deslignificación y calidad de pulpas producidas. Se desarrollaron doce digestiones por combinación de las variables que se llevaron a cabo con un 15% de NaOH; relación fibra: licor de 1:8.5; cantidad inicial de material fibroso seco de 600g y tiempo de elevación de 60 minutos. Los rendimientos de las pulpas obtenidas oscilaron entre 58.1% a 64.3%.

Las pulpas se expusieron a un proceso mecánico de desfibración y refinación. Se elaboraron hojas para tres grados de refinado de 500 CSF, 400 CSF y 300 CSF. Se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de resistencia para pulpas y componentes del cartón en estos tres puntos. La pulpa correspondiente a la digestión 12 (temperatura máxima: 160°C; tiempo de digestión: 150 min; % AQ: 0.1%) presentó en conjunto las mejores propiedades mencionadas previamente después de su valoración, con un rendimiento de 58.1%, lo cual la hace apta como potencial material sustituto de fibras provenientes de especies maderables, en formulaciones de mezclas con material reciclado.

Este trabajo comprende además el estudio del comportamiento de la pulpa producto de la cocción 11, que se sometió a un proceso de blanqueo siguiendo la secuencia HEHP establecida según los resultados de tres ensayos preliminares y reportes de literatura. La pulpa blanqueada presentó pérdida en las propiedades de resistencia, lo cual se atribuye al ataque del agente de blanqueo sobre la celulosa del material.

*Tesis

** . Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director, Luz Amparo Lozano Urbina; Codirector, Guillermo González Sierra.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el consumo del papel ha aumentado considerablemente. El interés creciente de cubrir la demanda y lograr la armonía entre la naturaleza y las industrias, se encuentra afectado por la inevitable disminución de recursos naturales. Esta situación es debida a la explotación constante de recursos madereros, a su lenta reforestación y a la contaminación, en general. Por lo tanto, la industria papelera busca generar iniciativas así como proponer procesos mejorados de producción cuya aplicación sea aceptable social y ambientalmente.

A nivel mundial, la mayor parte de pulpa celulósica es obtenida mediante el pulpeo kraft. Los compuestos de azufre empleados en este proceso producen gases como el sulfuro de hidrógeno y mercaptanos que contaminan el aire; para evitar este problema se han propuesto otros métodos alcalinos como una alternativa más favorable ambientalmente, eliminando el uso de compuestos azufrados.

Por consiguiente, en el desarrollo de estos métodos se ha encontrado que el uso de aditivos como la AQ en el proceso de pulpeo alcalino no sólo reduce totalmente la polución del aire sino que permite fabricar pulpas con un rendimiento similar al proceso kraft.

Según la literatura, la AQ es considerada el primer aditivo realmente eficaz en procesos alcalinos para aplicación industrial y comercial. El comportamiento redox de la AQ consiste en inducir una oxidación del grupo reductor terminal de los carbohidratos de la fibra, generando estabilidad en cuanto a las reacciones de despolimerización terminal.

Por otro lado, la AQ causa sobre la lignina una aceleración en las reacciones de hidrólisis, formando fragmentos de lignina de menor peso molecular, lo que se

refleja en un aumento en el grado de deslignificación. Por lo tanto, la aplicación de la AQ en el pulpeo mejora la calidad de la pulpa con respecto al proceso sin aditivo. Estas características de la AQ han extendido su aplicación en el pulpeo de materiales provenientes de desechos agrícolas como el sorgo, tallos de girasol y el bagazo como fuente opcional de fibra de celulosa virgen.

Ante la extensión del cultivo de la palma africana en Colombia y en base a la tendencia actual de explotación más eficaz de la biomasa y el empleo de procesos ambientalmente amigables, el Grupo de Investigación en Celulosa, Pulpa y Papel (CICELPA) consideró el empleo del raquis, material de desecho vegetal, como una alternativa potencial en la elaboración de pulpa utilizando la AQ como aditivo en el pulpeo.

Mediante el proceso soda y soda-AQ se obtuvieron pulpas para elaborar hojas de pulpa para papel, liner y corrugado medio. Además, se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de resistencia según las normas (TAPPI, UNE); con base en estos resultados junto con el grado de deslignificación logrado (43.6%), se consideró el proceso de digestión que obtuvo la mejor pulpa magra para blanquearse como: concentración de álcali (NaOH) del 15%, 0.1% de AQ, temperatura máxima de 160°C y tiempo de digestión de 120 minutos (rendimiento del 59.9%)g. Este tratamiento siguió la secuencia HEHP y se evaluó posteriormente la resistencia físico-mecánica de las hojas de pulpa blanqueada y su estabilidad mediante el sistema de envejecimiento acelerado.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN

La química en el campo del papel se desarrolla con el propósito de mejorar la calidad de este producto y, a su vez, proponer procesos innovadores que puedan ser utilizados actualmente en esta rama de la industria.

La calidad del papel está ligada a las características del material celulósico empleado, las cuales dependen de los procesos de obtención de pulpa, materias primas fibrosas y la producción del papel. De estos tres factores el que mayor influencia ejerce es el tipo de materia prima; le sigue en importancia el proceso de obtención de pulpa y por último, la fabricación de papel.

1.2 MATERIA PRIMA

Las fibras vegetales son las más empleadas en la fabricación del papel porque permiten colectarse, almacenarse y procesarse de manera económica para hacer viables las operaciones. Cumpliendo estos requisitos, se encuentra el raquis de la palma africana, cuyas características químicas y morfológicas facilitan el proceso de obtención de pulpa. De esta manera, el material no maderable intenta incursionar en la industria del papel como una fuente opcional de materia prima.

1.2.1 *Palma africana.* Hacia el año de 1750 el botánico Adams llamó bajo el nombre de “Palmiste” a la palma de aceite africana. En 1763, Jacquin hizo la descripción regional de la especie y le dió el nombre con el que actualmente se conoce: *Elaeis guineensis*.

Las primeras plantaciones de palma de aceite se introdujeron en la estación experimental de Palmira, en el Valle del Cauca, por Florentino Caes, hacia el año de 1932.

Figura 1. Palma africana



(QUESADA, 2002)

La clasificación botánica de la palma africana por Hutchinson corresponde a:

División: fanerógamas

Tipo: angiosperma

Clave: monocotiledóneas

Orden: pálmales

Familia: palmaceae

Tribu: cocoinea

Género: elaeis (guineensis y oleífera)

Existen dos especies del género *Elaeis* de interés económico: la palma africana (*Elaeis guineensis*) y la palma americana (*Elaeis Oleífera*); las plantaciones comerciales del mundo están sembradas casi exclusivamente con *E. guineensis*, mientras que la *E. oleífera* es importante en los programas de mejoramiento

genético para la obtención de un híbrido al cruzarla con la *E. guineensis*, el cual es resistente a enfermedades y produce un aceite más líquido.

Las principales características que se han explotado para aumentar el rendimiento de aceite han sido las del fruto. De acuerdo a estas características se pueden distinguir tres clases de palma, según su porcentaje favorable de extracción y su alta productividad de fruta. Actualmente, las palmas que se siembran son de la variedad *Tenera* (material empleado durante este proyecto), a pesar de ser menos resistente a ciertas enfermedades. A continuación se presentan las tres variedades:

- *Dura*: fruto con cáscara gruesa, superior a los 2 mm y con relativamente poco mesocarpio (20-65%). Por tener el mesocarpio o área aceitosa muy delgada, se obtiene una extracción de aceite baja.

- *Pisífera*: frutos sin cáscara y almendras pequeñas. Presentan mayor cantidad de pulpa y por ende mayor extracción, pero no se pueden utilizar comercialmente ya que los racimos no siempre alcanzan su madurez.

- *Tenera*: frutos con cáscara delgada y más mesocarpio que la *Dura* (60-96%). Se obtienen del cruce de la variedad *Dura* con la *Pisífera*.

Morfología. La palma aceitera es un árbol de gran altura que puede medir de 20 a 30 metros (en los cultivos a los 12,5 metros, las palmas se eliminan), con un diámetro aproximado de 50 cm. Consta de:

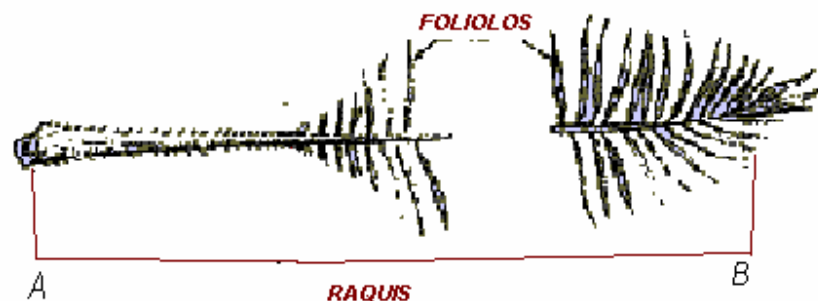
a. Sistema radicular: está constituido de raíces primarias las cuales se originan de un bulbo y tienen una longitud promedio de 5 metros. Estas a su vez dan origen a las secundarias, éstas a las terciarias, y las últimas a las cuaternarias, que son las

responsables de la absorción de agua y nutrientes. La mayor cantidad de raíces se encuentran localizadas en los primeros 30-50 cm del suelo.

b. Tallo o estípite: es vertical y presenta un aspecto escamiforme ya que se encuentra recubierto por la base de las hojas producidas en las diferentes etapas del crecimiento de la planta. Su crecimiento es de 35 a 45 cm por año.

c. Sistema Foliar: está constituido de una corona de hojas al final del tallo con un arreglo espiral. La corona está formada por hojas de diferentes tamaños en cantidades de 25 a 30, que llegan a alcanzar longitudes de 6 a 7 metros y un peso aproximado por unidad de 6 kilos; el centro presenta un conjunto de hojas no abiertas que constituyen el cogollo o flecha. Se producen de 2 a 3 hojas por mes, según las condiciones ambientales.

Figura 2. Hoja de la palma de aceite



(QUESADA, 2002)

d. Fruto: está constituido de afuera hacia adentro por un exocarpio (epidermis); un mesocarpio (pulpa) muy aceitoso; la semilla, constituida por un endocarpio (cáscara) duro y negro; el endosperma (almendra) y un embrión.

Reproducción. La reproducción de la palma es por medio de semillas. La obtención de semillas para las siembras comerciales se realiza a través de un extenso programa basado en polinización artificial, libre de contaminación, de palmas estrictamente seleccionadas por su producción de aceite por hectárea en el año principalmente.

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 normalmente manejado) se producen 24 toneladas de racimos por año. Es conocido que el número de racimos generado cada año es de 10 por palma y son cortadas 2 hojas por racimo, además de 2 que no dan racimo o que se atrofian, así la producción se aproxima a 22 hojas por palma al año.

Actualmente, la hoja de palma de aceite se emplea para 2 fines:

1. La generación de energía a partir de los subproductos de la palma africana, cuya capacidad de combustión es para la cascarilla de 4,9 Mcal/Kg, la fibra de 4,4 Mcal/Kg y el raquis de 4,3 Mcal/Kg, convirtiéndose en una ventaja competitiva con el uso del carbón de mediana calidad (6 Mcal/Kg), en la obtención de la energía necesaria para el proceso de extracción de aceite.

2. El reciclaje de nutrientes que consiste en retornar a partir de grandes cantidades de biomasa producidas durante el manejo y explotación del cultivo de palma africana, los nutrientes necesarios para mantener la productividad del suelo, generando una mayor autosuficiencia nutricional al cultivo y la disminución de la demanda de fertilizantes externos al sistema. El raquis que equivale al 25% del peso del racimo, proporciona un contenido nutricional de N 35%, K 22%, P 2.8%, Ca 1.49% y Mg 1.75%; de igual manera, cada tonelada de hoja 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. Sin embargo, la implementación de los subproductos

como fuente de nutrientes para el suelo, trae consigo ciertas desventajas como la contaminación por la descomposición de estos desechos al aire y el impedimento del libre drenaje del agua a las raíces de las plantas.

Factores ambientales

- **Clima:** el clima que se requiere para que una plantación de palma dé un alto grado de producción de aceite, está determinado por una distribución uniforme de las lluvias (100-150 mm por mes), una temperatura mensual mínima sobre los 20°C y una adecuada radiación solar. Estas características se han determinado con base en los factores climáticos de las mejores regiones donde crece la palma africana.

- **Temperatura:** las áreas geográficas de gran producción tienen una temperatura máxima entre 29 y 32 °C, y una temperatura mínima entre 22 y 24 °C.

- **Necesidades Hídricas:** la palma de aceite es una planta de desarrollo continuo. Su actividad fotosintética, crecimiento y producción son indeterminados, por lo que la planta tiene necesidad de agua durante todo el año que le permite dar un rendimiento óptimo. La precipitación debe reemplazar continuamente la cantidad de agua sustraída por la planta de las reservas en el suelo, de manera que la evapotranspiración se realice de forma normal.

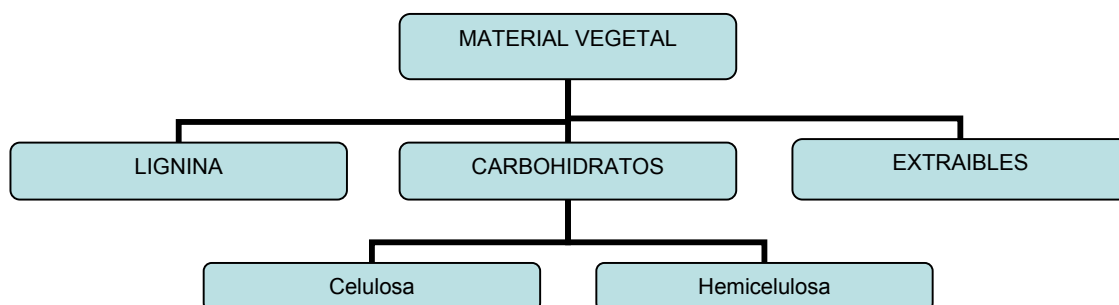
Plantaciones de Palma en Santander

En Santander ya se tienen sembradas 49.713 hectáreas de palma aceitera. La empresa Indupalma tiene proyectado sembrar 40.000 hectáreas nuevas de palma en este departamento antes de culminar el año 2015.

1.3 ESTRUCTURA DE LOS VEGETALES FIBROSOS

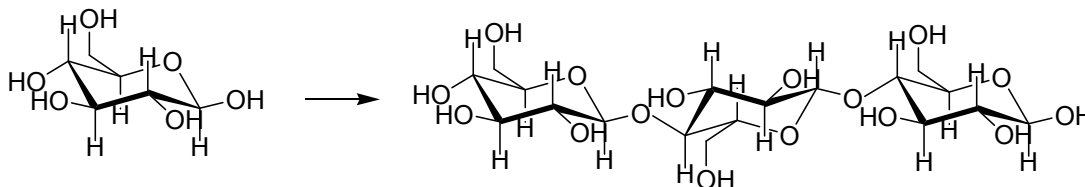
Las fibras vegetales requeridas para la producción de papel tienen la siguiente composición:

Figura 3. Composición química de los vegetales.



De todos los anteriores constituyentes, la celulosa es la única sustancia que posee la propiedad de presentarse como fibra, de aquí el interés de separarla de la matriz en que se encuentra (ligada a las hemicelulosas y lignina).

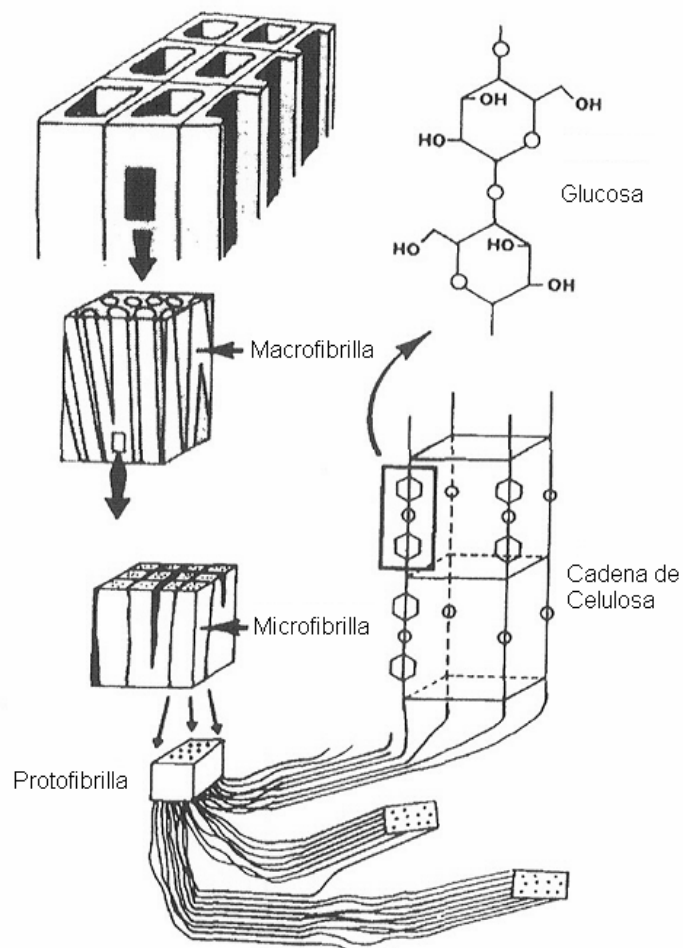
Figura 4. Condensación de la glucosa.



(SANJUAN, 1997)

La celulosa es un carbohidrato integrado por la repetición sucesiva de unidades de celobiosa y ésta a su vez, se encuentra formada por dos unidades de glucosa. Así, la fórmula molecular que la celulosa presenta se reduce a $(C_6H_{10}O_5)_n$, siendo n el número de unidades de glucosa que forman la cadena; también, se denomina grado de polimerización (GP), que oscila para las fibras utilizadas en la fabricación de papel, entre 600-1500 GP.

Figura 5. Organización del esqueleto de celulosa en la pared de la fibra.

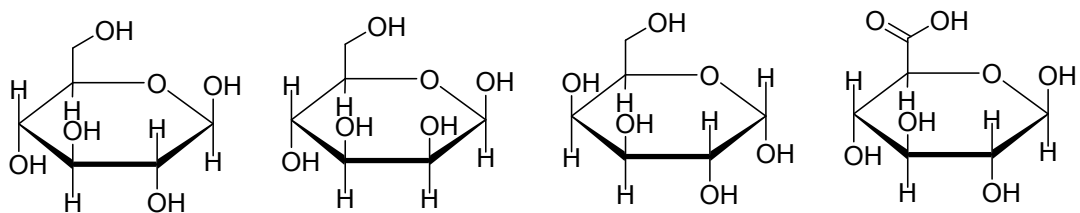


(BAUCHER et al., 2003)

Las microfibrillas celulósicas se ordenan en el interior de la planta, de tal forma que se ajustan en segmentos largos formando regiones cristalinas, que son difíciles de penetrar por solventes u otros agentes. En cambio, las regiones amorfas formadas son fácilmente penetradas lo que ocasiona que sean más susceptibles a reacciones de hidrólisis. Esta propiedad de la celulosa es la responsable de que las moléculas y en consecuencia las protofibrillas, microfibrillas y fibras, presenten resistencia debido a las zonas cristalinas; y en contraste, por las zonas amorfas, las fibras sean flexibles.

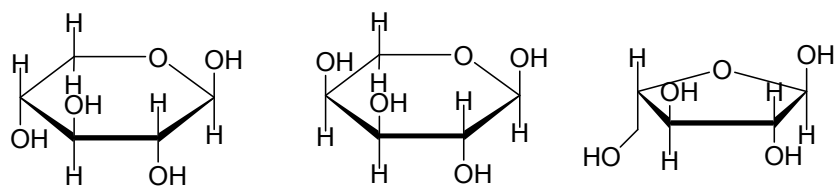
Figura 6. Unidades estructurales de las hemicelulosas

Hexosas



β -D-Glucosa β -D-Manosa α -D-Galactosa Acido β -D-Glucorónico

Pentosas



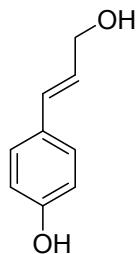
β -D-Xilopiranososa α -L-Arabinopiranososa α -L-Arabinofuranosa

(SANJUAN, 1997)

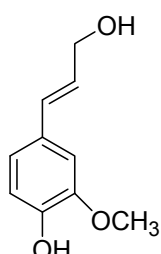
En la estructura de los vegetales, también se encuentran otros tipos de compuestos que contienen cierta cantidad de carbohidratos no celulósicos denominados hemicelulosas, cuyas unidades conformacionales son azúcares de tipo pentosas (β -D-xilosa, α -L-arabinopiranososa) y hexosas (β -D-glucosa, β -D-manosa, α -D-galactosa), dependiendo de la planta considerada. Estructuralmente, las hemicelulosas se diferencian de la celulosa en que no son fibras, están ramificadas y tienen masas moleculares más bajas (GP 200).

Tanto la celulosa como las hemicelulosas están unidas entre sí por una sustancia polimérica de estructura amorfa denominada lignina, cuya función es formar la lamela media que adhiere las fibras unas con otras por medio de enlaces covalentes y puentes de hidrógeno; además, debido a su carácter hidrofóbico favorece el flujo de agua hacia la parte superior de la planta. Este biopolímero forma parte de los tejidos de sostén de los vegetales, por esto es responsable de su consistencia y rigidez. La estructura química de la lignina se basa principalmente en unidades de fenilpropano, enlazadas en tres dimensiones. La unidad de fenilpropano consta básicamente de un anillo aromático y de una parte alifática –cadena lateral- de tres átomos de carbono, denominados α , β y γ . Las uniones entre los monómeros han de ser quebradas para poder separar las fibras celulósicas necesarias en la obtención de pulpa.

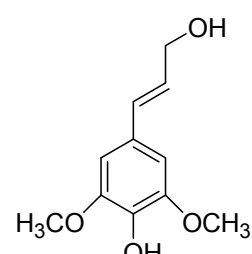
Figura 7. Alcoholes precursores de la lignina.



Alcohol trans-cumarílico



Alcohol trans-coniferílico



Alcohol trans-sinapílico

(SANJUAN, 1997)

En la molécula de fenilpropano, una vez que los alcoholes precursores han deshidrogenado su radical OH fenólico, el átomo de oxígeno puede enlazarse con otro radical, con lo que se forman enlaces éter intermoleculares de tipo $\beta\text{-O-4}$ en un 50-60% y de tipo $\alpha\text{-O-4}$ en un 6-8%. Los enlaces restantes son uniones fuertes C-C. De esta forma, los dímeros se polimerizan cada vez más y forman la macromolécula de la lignina.

Además de los anteriores componentes, existen en las plantas pequeñas cantidades de otros materiales de diferente naturaleza, que varían de manera notable entre las diferentes especies, así como de su ubicación geográfica. Entre estas sustancias se encuentran los extraíbles que se dividen en tres grupos: terpenos y terpenoides, sustancias volátiles responsables del olor característico de la planta; compuestos alifáticos (grasas y ceras); y, compuestos fenólicos que actúan como fungicidas contra el ataque de microorganismos. Por otra parte, se presenta el material inorgánico constituido por cationes: potasio, calcio, etc; y, aniones como los carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfatos. Estos compuestos minoritarios permanecen en un mayor o menor grado en las pulpas, originando, en posteriores etapas del proceso, serios problemas.

1.4 PROCESO DE OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPAS

Las fibras no maderables más importantes para la industria de pulpa y papel son las provenientes de los desechos agrícolas en los que normalmente se emplean los procesos alcalinos, donde el licor de cocción corresponde al hidróxido de sodio o una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio (proceso Kraft). Aunque éste último, en materiales maderables supera al proceso a la soda en cuanto al grado de deslignificación y propiedades de resistencia en las pulpas, genera contaminación ya que el ataque de iones SH^- sobre los grupos metoxilos de la lignina produce sulfuros emitidos como olores desagradables. Esto conduce a la

investigación e innovación de los procesos mencionados, por ejemplo la adición de la AQ en el tratamiento con soda que actúa como acelerador en el pulpeo alcalino. En este sistema, la AQ estabiliza los carbohidratos e incrementa la velocidad y selectividad de deslignificación, lo que conlleva a igualar en rendimiento al proceso convencional Kraft. Con este tratamiento se busca obtener pulpas de buena calidad y se impide la formación de productos que contaminan el medio ambiente.

Los tratamientos con soda y soda-AQ como procesos semiquímicos, constan de dos etapas que implican una etapa química y una etapa mecánica.

1.4.1 Etapa química. Consiste en mezclar la materia fibrosa con el licor de cocción y aditivos (AQ); mediante la aplicación de calor el material experimenta una acción química, cuyo objetivo principal es generar el debilitamiento químico del complejo lignina-carbohidrato dejando así libres las fibras. Las variables de mayor importancia en esta etapa son:

- Concentración del Licor. Como las fibras de plantas no maderables se impregnan con facilidad y tienen un contenido bajo de lignina reactiva, la cantidad de reactivos que se necesita es menor que en el pulpeo de madera. Por lo tanto, se requiere de 10 al 15% de NaOH referido al material fibroso base seca. Si la concentración aumenta se presenta mayor absorción de NaOH y disminución del rendimiento por degradación de carbohidratos.

-Porcentaje de AQ. La adición de pequeñas cantidades de este catalizador entre 0,05 a 0,1% sobre el material base seca al licor de cocción, incrementa la velocidad de deslignificación y rendimiento del pulpeo, al igual que mejora las propiedades fisicomecánicas relacionadas a las pulpas.

- Hidromódulo. Es la relación en peso entre la cantidad del licor y material fibroso base seca que se añade al digestor. El volumen del licor adicionado es fundamental para lograr una eficiente circulación interior permitiendo con esto una buena penetración del agente químico y, por consiguiente, obtener una pulpa de calidad uniforme.

- Temperatura de cocción. Como las plantas no maderables presentan un contenido alto de hemicelulosas y bajo de lignina, este material se pulpea con mayor facilidad y el proceso de deslignificación requiere de temperaturas bajas entre 145 a 165°C, en comparación a las normalmente empleadas para especies maderables.

El ciclo de cocción se puede dividir en dos fases:

- Tiempo de elevación. Cuando la elevación de la temperatura es lenta, se efectúa una penetración completa del material lográndose una mayor eliminación de la lignina, además se logra que la concentración del álcali sea menor cuando el digestor alcance la temperatura máxima, de este modo el ataque a la celulosa es mínimo.

- Tiempo a temperatura máxima de cocción. La fijación de este parámetro dependerá de la concentración de álcali activo, porcentaje de antraquinona y temperatura; y también, de la especie de planta que se empleará.

1.4.2 Etapa mecánica. En esta parte, las fibras se separan por acción de efectos mecánicos y térmicos, donde la pulpa adquiere sus propiedades mecánicas. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Desfibración. Este proceso consiste de dos acciones; la primera, es el calentamiento de la unión entre fibras y su posterior debilitamiento. La segunda, es

la desintegración real de los haces y nudos de fibras y su separación en fibras individuales. Este estadio del proceso se lleva a cabo mediante un molino de discos.

- Refino. Proceso de batido que se da a las fibras suspendidas en agua, produciéndose importantes variaciones físicas: hinchamiento, fibrilación y corte, que influirán posteriormente en la calidad de la pulpa.

El hinchamiento viene provocado por la penetración del agua, la cual es retenida por la fibra en un proceso de hidratación, favoreciendo de esta manera la acción mecánica del equipo refinador.

La fibrilación, se produce cuando se elimina la pared primaria, muy fina, que mantiene a los filamentos unidos; así, en el momento de la formación de la hoja, se establecen mayor número de contactos fibra a fibra, teniendo como consecuencia mejores propiedades físico-mecánicas y una disminución del espesor.

El corte excesivo de las fibras es nefasto para las cualidades de resistencia ya que éstas presentan también dependencia de la longitud de la fibra; por lo tanto, hay que cortar lo mínimo posible que obligue la formación de la hoja.

1.4.3 Blanqueo. Tratamiento químico, cuyo objetivo principal es eliminar el color oscuro que tiene la pulpa después del proceso de cocción. Este aspecto aparece por la presencia de grupos funcionales (cromóforos) predominantes en la lignina, que por un mecanismo de oxidación se transforman en estructuras químicas capaces de absorber la luz. El desarrollo de esta etapa requiere determinar previamente la cantidad de lignina residual presente en la pulpa, y se obtiene mediante el método de número kappa, que establece el grado de deslignificación

alcanzado. Una de las secuencias más comunes en el proceso de blanqueo es la HEHP, que implica las siguientes partes:

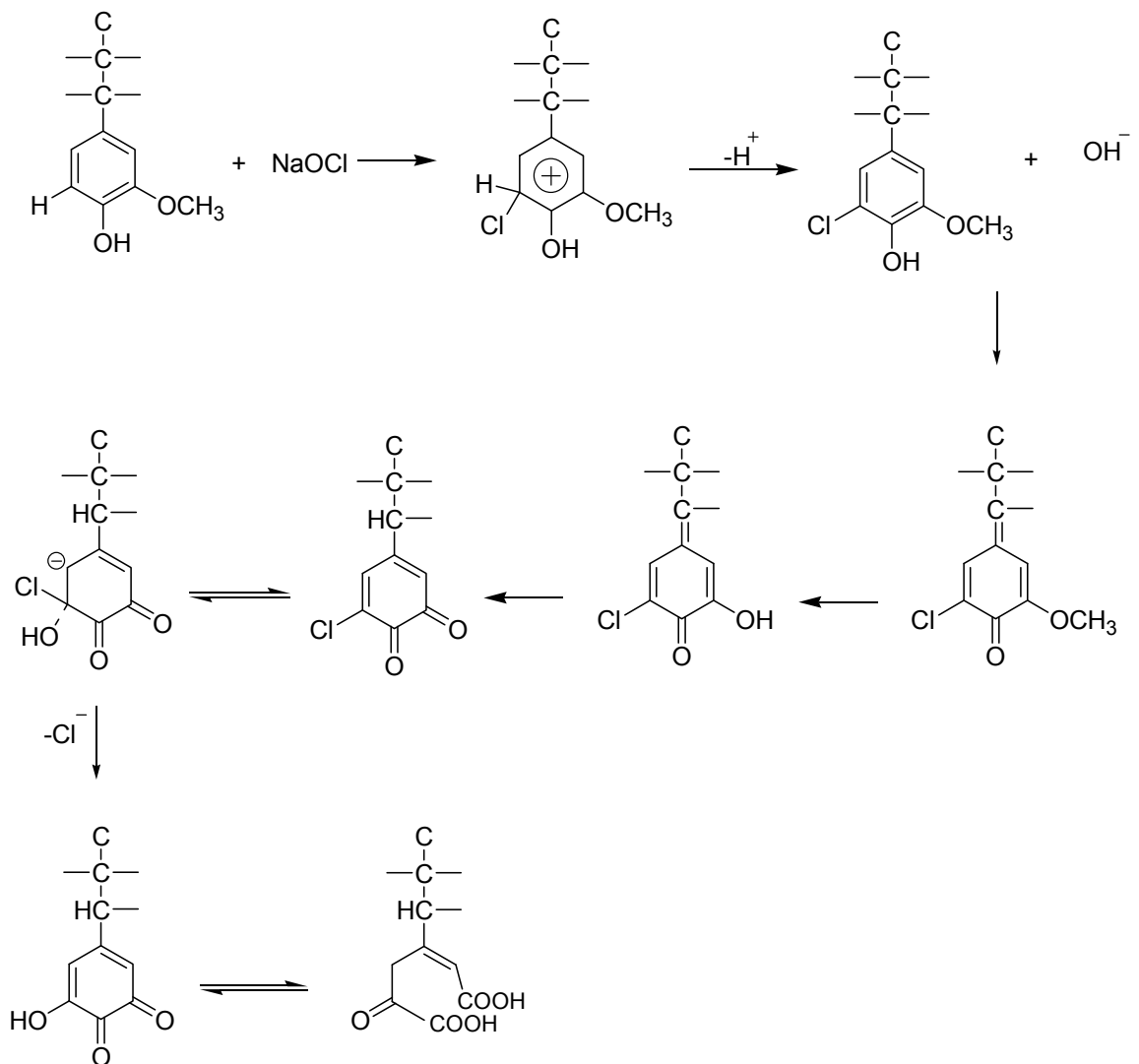
-Blanqueo con hipoclorito (H). Este agente oxidante es un nucleófilo que ataca principalmente las posiciones que tienen baja densidad electrónica, especialmente a los átomos de carbono de grupos carbonilo o de enlaces dobles conjugados. Como resultado de estas reacciones, la lignina se fragmenta a ácidos carboxílicos de bajo peso molecular y posteriormente se disuelven. A consecuencia de la destrucción de los grupos cromóforos y la disolución de la lignina, se incrementa la blancura de la pulpa.

Los hipocloritos son muy efectivos en el proceso de blanqueo de pulpas, pero no son muy selectivos en la oxidación de la lignina sin oxidar carbohidratos. Aunque la velocidad de ataque a la lignina es mucho mayor que a los carbohidratos, la celulosa y la hemicelulosa son atacados en varias formas durante el blanqueo. Los grupos hidroxilo se oxidan a carbonilo lo que hace susceptible la rotura de las cadenas de celulosa en soluciones alcalinas, generando reducción del grado de polimerización. El ataque del hipoclorito sobre los grupos hidroxilo en las posiciones 2,3 y 6 de la glucosa induce la división entre las posiciones 2 y 3 haciendo posible generar sustancias que contienen 2 y 4 átomos de carbono. Estudios sobre la oxidación de la celulosa por el hipoclorito presentan evidencia de la existencia de cetonas y aldehídos, algunos grupos carbonilo se oxidan un poco más llegando al grupo carboxílico, especialmente a altos valores de pH y esto aumenta la estabilidad frente a los álcalis y al envejecimiento.

El tratamiento con hipoclorito suele llevarse a cabo con una temperatura de 30 a 60°C con tiempos de retención de 3 a 4 horas, y un rango de pH entre 9 y 1, asegurando que bajo estas condiciones se alcance la mayor eficiencia de esta operación y se preserven los carbohidratos de la pulpa. Por otro lado, la cantidad

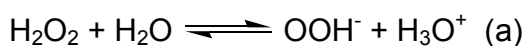
de hipoclorito adicionado se establece según el número kappa de las pulpas morenas y se determina el número de cloro.

Figura 8. Reacción del Hipoclorito con las unidades estructurales de la lignina.



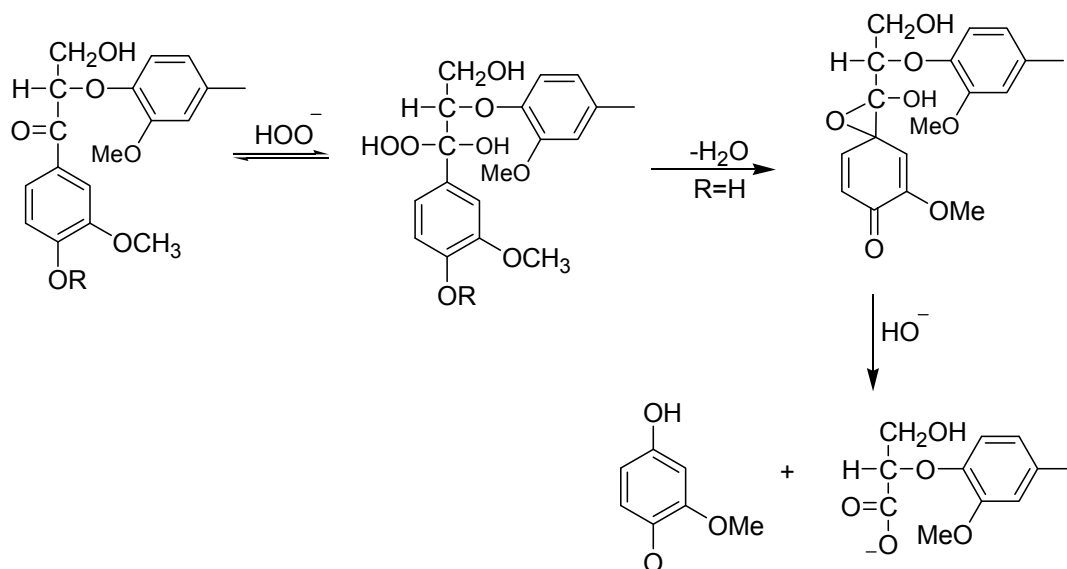
-Extracción Alcalina (E). La soda empleada disuelve una gran cantidad de lignina al convertir los grupos fenólicos hidroxilo y carboxilo a sus sales más hidrofílicas; de esta manera, elimina los productos degradados y coloreados de la pulpa. Esta etapa se lleva a cabo a una temperatura entre 60-80°C y con tiempos de retención de hasta 60 minutos. La extracción alcalina como parte de una secuencia de blanqueo, sirve para limpiar y abrir la fibra para un tratamiento más efectivo en las etapas oxidativas subsiguientes; para remover la lignina degradada proveniente de la anterior etapa, y, contribuir a la calidad de la pulpa en cuanto a sus propiedades de resistencia y blancura influenciadas por el proceso global de blanqueo.

-Peróxido. La acción del peróxido sobre los compuestos no carbohidratados consiste en inactivar los grupos de color que están acoplados a moléculas mayores sin atacar severamente la estructura principal. El peróxido de hidrógeno bajo condiciones alcalinas se descompone en el anión perhidroxil (OOH⁻) (ecuación a), el cual reacciona con varias estructuras carbonil coloreadas en la lignina para producir aldehídos y ácidos carboxílicos incoloros. Posiblemente, el peróxido destruye los grupos O-quinona eliminando los sistemas que causan reversión, de este modo la pulpa blanqueada presenta gran estabilidad.



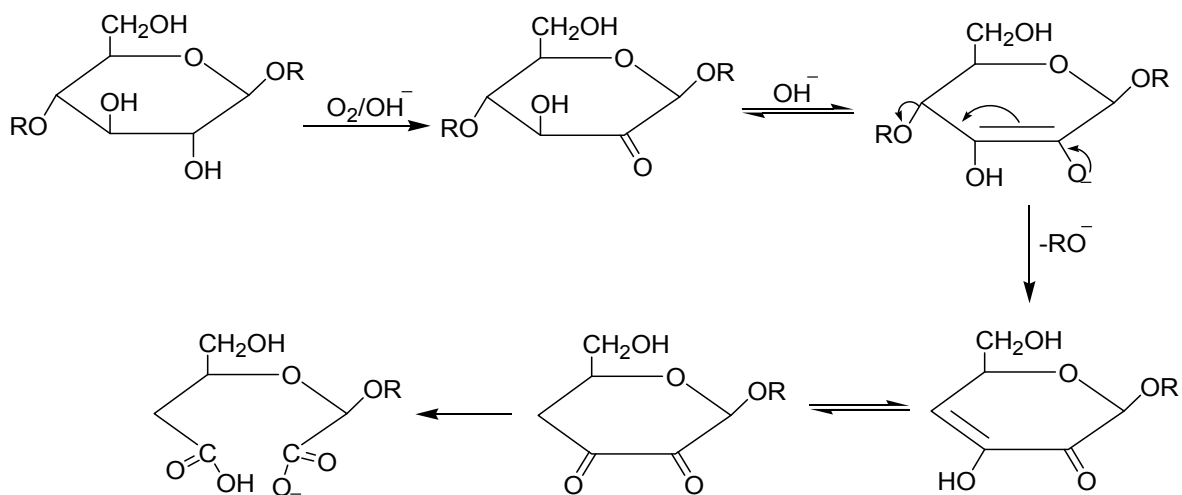
El blanqueo con este agente se realiza bajo temperatura de 65 a 80°C, con un tiempo que va de 2 a 4 horas. El pH práctico es de 10.5 y debe ajustarse para evitar la reacción secundaria no reversible que se favorece cuando existe un pH demasiado alcalino, la cual destruye los iones OOH⁻ de interés en este proceso.

Figura 9. Reacción de Dakin: ataque del peróxido de hidrógeno sobre la lignina.



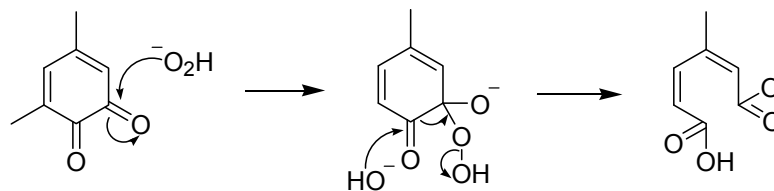
(DANG, 2007)

Figura 10. División del enlace glicosídico durante el blanqueo alcalino $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$



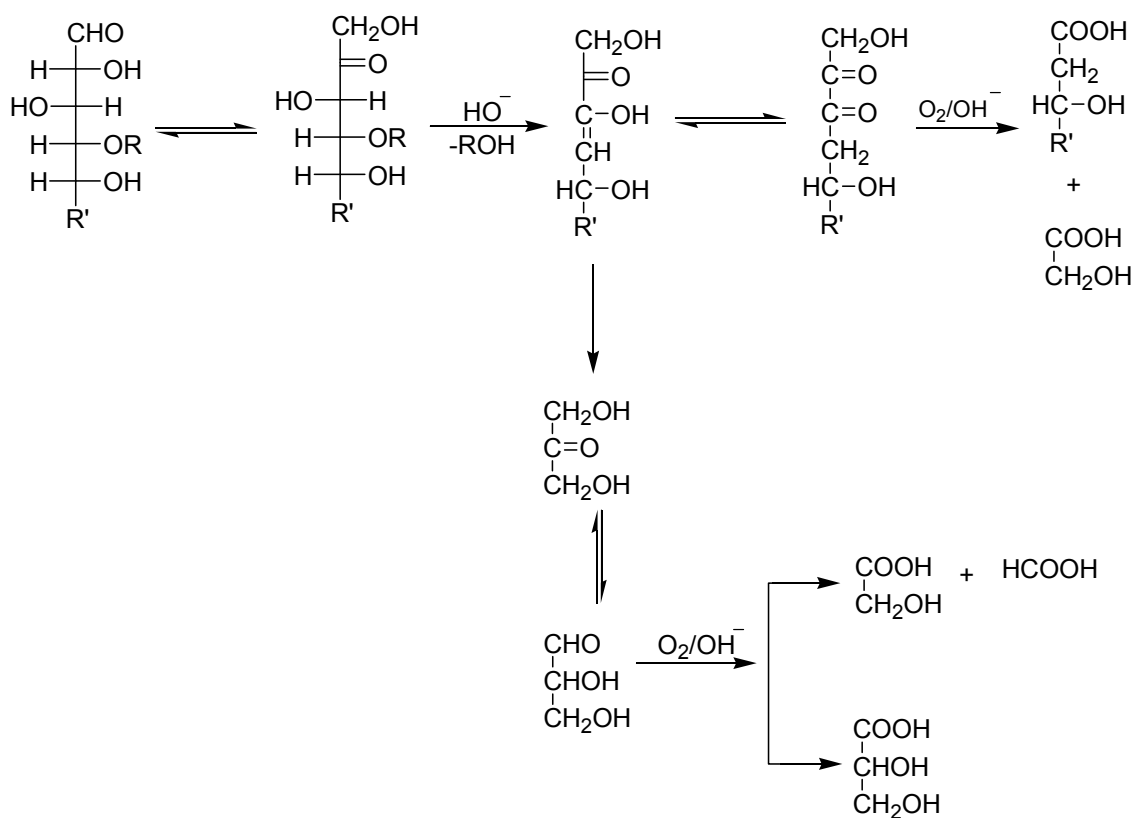
(DANG, 2007)

Figura 11. Ataque del peroxianión sobre la o-quinona



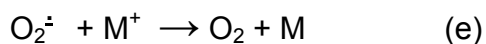
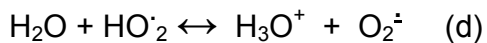
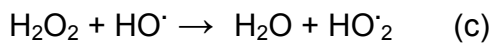
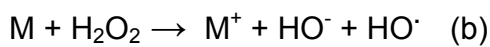
(DANG, 2007)

Figura 12. Reacción de acortamiento de polisacáridos durante el blanqueo O_2/H_2O_2



(DANG, 2007)

La descomposición del peróxido liberando oxígeno es catalizada por algunos iones de metales pesados, particularmente manganeso, hierro y cobre (ecuaciones b-e). La inmovilización de estos iones metálicos es necesaria y se efectúa por la adición de sulfato de magnesio, silicato de sodio y ácido dietilentriaminopentacético (DTPA), que actúan como agentes secuestrantes, estabilizando el sistema conforme es necesario por las reacciones en desarrollo.



M: metal de transición. (FRANCIS, 1991)

El rango de peróxido empleado del 1 al 2% es el aplicado industrialmente y al final debe permanecer un remanente del 10 al 20% del porcentaje inicial, para contrarrestar el riesgo de amarillamiento de la pulpa por efecto del álcali sobre los carbohidratos.

1.4.4 Propiedades físico-mecánicas de la pulpa. Un último análisis es el estudio de las propiedades mecánicas de la pulpa evaluada con las normas TAPPI-UNE, para determinar la calidad del material y establecer su uso para la elaboración de papel y combinado para liners y papeles onda.

Para valorar las propiedades mecánicas y ópticas de una pulpa es necesario preparar o formar una hoja, la cual en muchos casos se denomina incorrectamente papel. Sin embargo, los papeles se hacen con la misma materia

prima más otros elementos, por consiguiente, se presenta una diferencia considerable en los papeles comerciales.

La medición de las propiedades de las hojas de prueba depende del equipo usado y de los detalles del procedimiento; además, están afectadas en gran medida por el contenido de humedad. Por este motivo, antes de realizar cualquier prueba las hojas deben acondicionarse a 23 ± 2 °C y $50\pm 2\%$ de humedad relativa.

Entre las principales características se encuentran:

- Densidad: se expresa en g/cm^3 y se calcula dividiendo el peso en g/m^2 entre el calibre en micras. Con la densidad se puede calcular el volumen específico ($1/\text{densidad}$).

-Gramaje: masa de un papel o cartón expresada en g/m^2 , medido bajo condiciones normalizadas.

-Calibre: distancia perpendicular entre dos superficies paralelas planas y circulares con diámetro aproximado de 16 mm, se mide con un micrómetro y se expresa en milésimas de pulgadas.

-Resistencia al doblez: indica la aptitud de un papel para ser doblado o arrugado sin sufrir roturas o enmendaduras por un buen período de tiempo. El aparato utilizado es el MIT y se expresa como el valor promedio del número de dobleces requeridos para producir la ruptura.

-Resistencia a la explosión: se define como la máxima presión aplicada uniformemente y en ángulo recto sobre la superficie del papel, bajo el método normalizado. Se expresa en índice de explosión, reportando sus unidades en $\text{KPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$.

- Resistencia al rasgado: se entiende como la fuerza perpendicular al plano del papel requerida para rasgar una hoja de papel a través de una distancia determinada, después de un corte inicial. Se expresa como índice de rasgado con unidades de $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$.

-Resistencia a la tensión: se considera como la máxima fuerza de tensión por unidad de ancho aplicada en una tira de papel hasta su ruptura bajo condiciones preestablecidas. Su expresión objetiva es el índice de tensión con unidades de $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$.

Además, se encuentran las propiedades ópticas de la hoja de pulpa entre ellas la blancura; ésta se determina mediante un espectrofotómetro Zeiss Elrepho. La blancura se mide como el valor de la reflectancia -tomando como punto de comparación el óxido de magnesio- en la región azul del espectro visible.

Por otra parte, existen ciertas características que establecen la utilidad de las pulpas para ser empleadas en la fabricación de cartón combinado. La mezcla de fibras obtenidas de diferentes procesos (Kraft, a la soda, al sulfito, semiquímicos y mecánicos) y materias primas (maderas tropicales, bagazo, tamo, etc) permiten maximizar una propiedad en particular o minimizar costos.

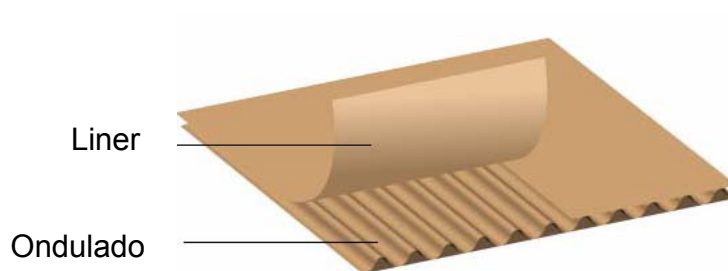
Se pueden establecer como elementos fundamentales para la existencia de empaques de cartón corrugado, la necesidad de protección que requiere un producto desde el lugar de su elaboración hasta el consumidor, la comodidad de ofrecer un método seguro para almacenar los productos, el mensaje comercial que ofrece su impresión, mientras se encuentra almacenado o es transportado. Además, es uno de los empaques más seguros y económicos.

Se denomina cartón corrugado a la estructura formada por un nervio central de papel ondulado (Papel Onda), reforzado externamente por dos capas de papel

(Papeles liners o tapas) pegadas con adhesivo en las crestas de la onda. Es un material liviano, cuya resistencia se basa en el trabajo conjunto y vertical de estas tres láminas de papel. El cartón corrugado pierde su resistencia si la onda sufre aplastamientos o quebraduras producidos por fuerzas externas.

El papel onda o corrugado medio se fabrica a partir de una gran variedad de fibras y mezclas. De especial importancia es su contenido de lignina, que aporta necesaria termoplasticidad al papel para permitir la formación (moldeo) de la onda sin romperse o posteriormente aflojarse y perder su forma o rigidez. Se suelen utilizar fibras cortas y largas en estados vírgenes o reposados.

Figura 13. Componentes del cartón corrugado



El cartón combinado tiene como primer factor el estar constituido por una hoja de papel que ha sido ondulada al pasar por dos rodillos con superficies en forma de ondas.

El tipo de onda influye principalmente en la protección contra los choques o presiones a que se somete la caja. Al observar en forma vertical al papel ondulado, se puede apreciar la formación de una serie de columnas, cuya forma estructural básica es capaz de soportar grandes cargas o pesos. La unión de un

solo liner con el corrugado se denomina ondulado de cara sencilla y suele utilizarse para empacar materiales frágiles y de forma irregular. Al observar en forma horizontal las ondas o corrugaciones unidas al liner, se puede apreciar como éstas presentan áreas que constituyen otra forma estructural básica y la más fuerte de mantener un espacio dado. El aire entre las flautas o corrugaciones acolchona y protege el contenido de la caja y lo aísla. Este factor ayuda a obtener un material liviano lo que reduce los problemas de manipulación y costos de transporte. La combinación de columnas y arcos produce un material mucho más fuerte que el papel del cual se originó.

Las características de las cajas que más interesan al fabricante de las cajas de cartón ondulado, son aquellas que más contribuyen a la protección contra las caídas, a la resistencia al apilado y protección contra las perforaciones, vibraciones, etc. Para definir esas propiedades físicas necesarias se utilizan los ensayos siguientes:

-Gramaje en g/m^2 .

-Resistencia a la Compresión Vertical (CLT): determina la rigidez al aplastamiento vertical del liner por sus bordes, midiendo la fuerza requerida para aplastar una tira del material. La lectura se expresa en lb-f.

-Resistencia a la Compresión Vertical (RCT): determina la fuerza requerida para aplastar una tira de papel colocada en una guía circular, cortada en el sentido longitudinal. El aplastamiento se hace en sentido transversal de la máquina papelera. La lectura se expresa en lb-f.

-Resistencia a la Compresión Horizontal (CFC): determina la fuerza requerida para el aplastamiento horizontal o de borde de una probeta de papel ondulado en laboratorio y se corta en sentido longitudinal de la máquina papelera. El

aplastamiento se hace en sentido transversal de la máquina papelera. La lectura se expresa en lb-f.

-Resistencia del Corrugado Medio (CMT): determina la resistencia a la compresión en plano de los papeles onda hecho sobre una probeta de papel ondulado y cortada en el sentido longitudinal de la máquina papelera. La lectura se expresa en lb-f.

1.5 COMPORTAMIENTO QUÍMICO

Los principales componentes de la fibra vegetal, celulosa, hemicelulosa y lignina, presentan características químicas diferentes que generan distintos comportamientos frente a agentes químicos y procesos mecánicos, desarrollando los variados tratamientos de separación que son el objetivo final de la fabricación de la pulpa.

El comportamiento de estas sustancias frente al ambiente químico es muy diferente. La celulosa es altamente hidrofílica debido a la presencia de grupos polares (hidroxilo), que permiten en su estado amorfo la absorción de moléculas de agua (hidratación) lo cual genera el hinchamiento de la fibra y mejora simultáneamente la flexibilidad y capacidad de enlace con otras fibras adyacentes.

Las hemicelulosas modifican sus propiedades durante el procesado de pulpa; además, por su estructura no presenta un comportamiento hidrofílico o hidrofóbico marcado, lo cual se refleja en su alta solubilidad en una gran cantidad de disolventes que retiran proporciones consideradas de la cantidad inicial de hemicelulosas durante la obtención de pulpa.

Los carbohidratos pueden responder de varias maneras a las condiciones de cocción: se pueden disolver en el licor, degradar para formar productos solubles

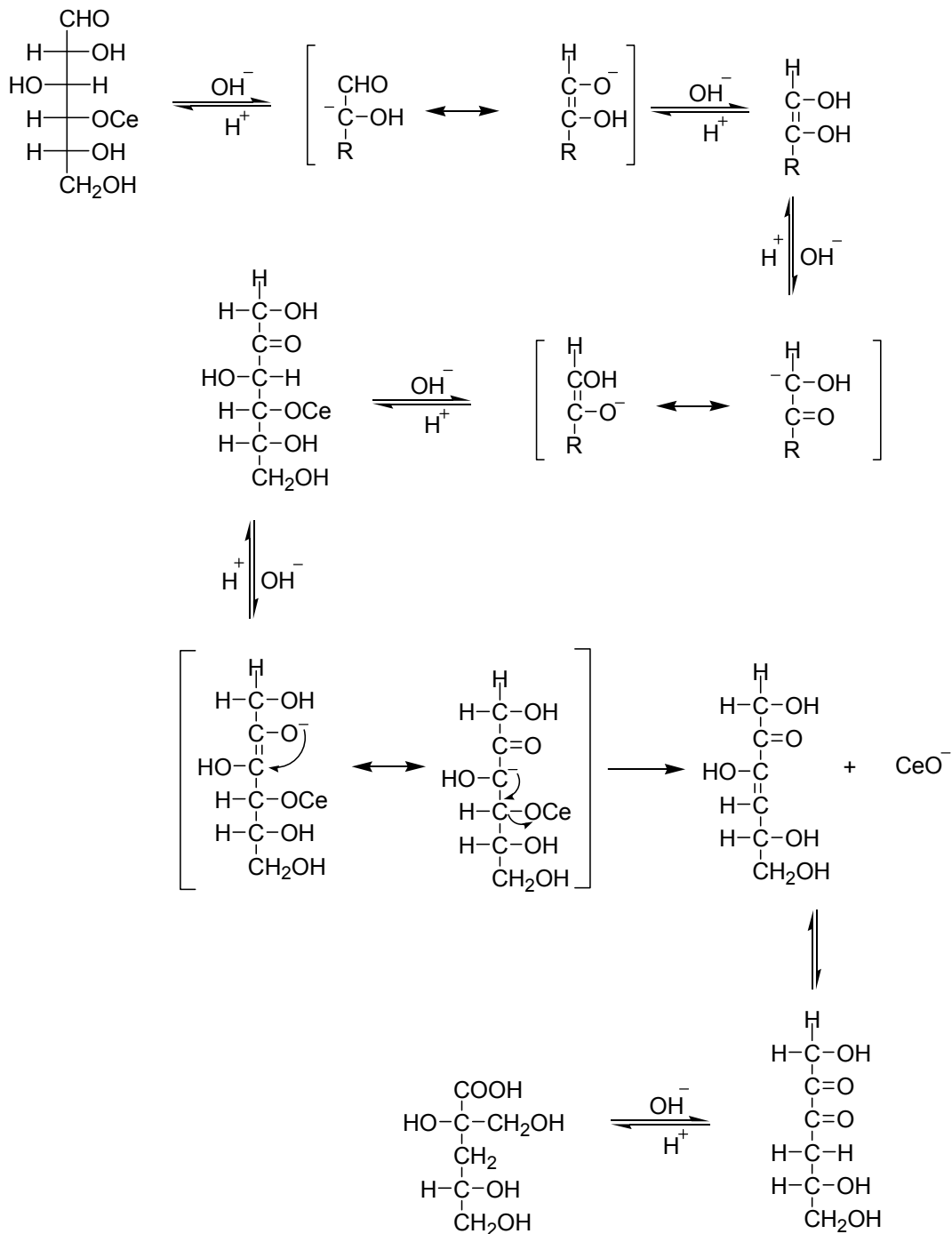
de bajo peso molecular o bien permanecer en la fibra. En general, se ha establecido que durante el pulpeo alcalino de material lignocelulósico tienen lugar dos tipos de degradación de las cadenas de carbohidratos; la reacción de acortamiento de diferentes unidades terminales y la hidrólisis alcalina de enlaces glucosídicos. La primera es principalmente responsable por la pérdida del rendimiento de cocción y del grado de polimerización, ya que tiene lugar la hidrólisis alcalina mediante la separación del ácido isosacarínico dentro de la cadena de celulosa, produciéndose así nuevos grupos terminales reductores y su degradación.

Sin embargo, los carbohidratos no se degradan totalmente y se hacen estables frente al álcali por ausencia de los grupos carbonilo terminales, debido a la transformación de la unidad glucosídica final en ácido metasacarínico. Esta es una reacción de competencia frente a la de acortamiento y se denomina reacción de frenado.

En contraste con la reacción de acortamiento, la hidrólisis alcalina no incluye un grupo terminal sino una división al azar de los enlaces glucosídicos para una formación de nuevos grupos terminales reductores, que son sometidos a una degradación adicional (acortamiento secundario). Esta reacción procede lentamente y sólo cantidades limitadas de enlaces glucosídicos se rompen hasta alcanzar la temperatura de cocción.

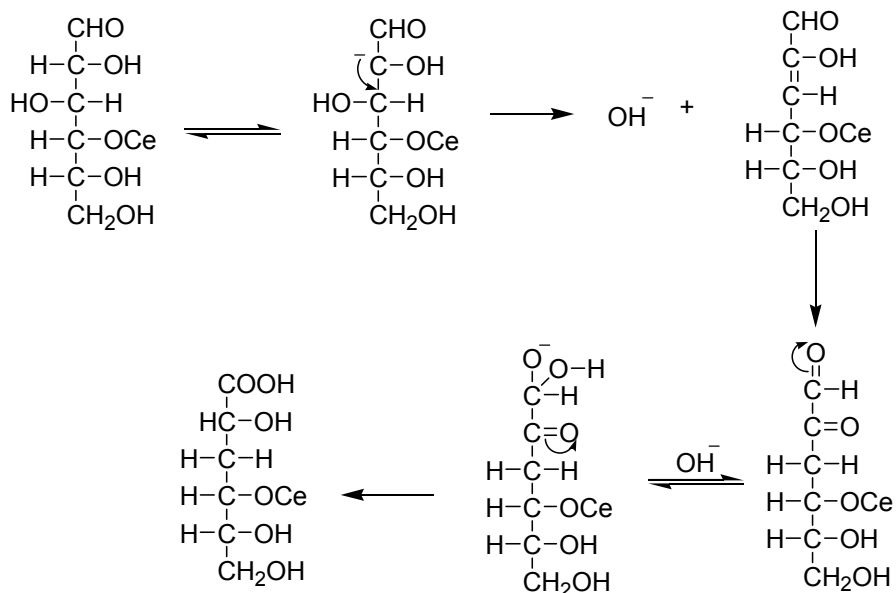
Durante las digestiones de procesos alcalinos, las hemicelulosas tienden a degradarse a simples azúcares. El mecanismo de degradación sigue la serie de reacciones de eliminación de los grupos terminales y de frenado que se describieron para la celulosa. Además, las hemicelulosas se encuentran en el vegetal parcialmente acetiladas y las soluciones alcalinas saponifican estos grupos acetilos, los separa de la cadena principal y facilitan que éstas sean absorbidas por la celulosa.

Figura 14. Degradación de la celulosa en medio alcalino.



(GARCIA, 1987)

Figura 15. Estabilidad de la Celulosa en medio alcalino.



(GARCIA, 1987)

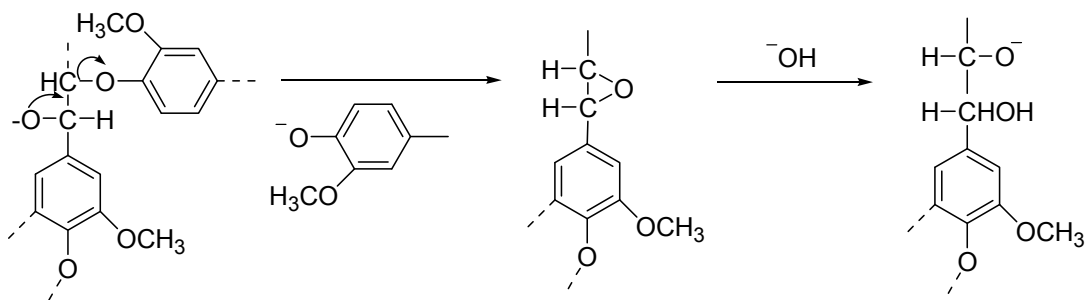
Al mismo tiempo, la mayor parte de sustancias saponificables son eliminadas durante el proceso de cocción. Así, las grasas se transforman a su forma salina, los ácidos resínicos tienden a desplazarse en su forma iónica, contribuyendo a mantener en un equilibrio coloidal la forma no disociada del ácido facilitándose de este modo su separación en las siguientes operaciones de lavado.

Por otro lado, las reacciones de la lignina en medio alcalino pueden ser de fragmentación o condensación. La fragmentación es la reacción deseada, envuelve la ruptura de los enlaces éter; mientras la condensación, genera uniones C-C muy fuertes y estables. La lignina degradada se disuelve en el licor de cocción como fenolatos de sodio. Para explicar la degradación de la lignina, se tienen las siguientes estructuras:

- *Estructuras con enlaces éter en el carbono α* . Sólo en el caso de las estructuras α -O-4 abiertas existe fragmentación de la lignina.

- *Estructuras fenólicas eterificadas con enlaces β -O-4*. En la reacción se desplaza un oxirano con lo que se forma una estructura α,β -glicol, y se promueve una deslignificación eficiente mediante la fragmentación de la lignina y la formación de grupos hidroxilo fenólicos libres.

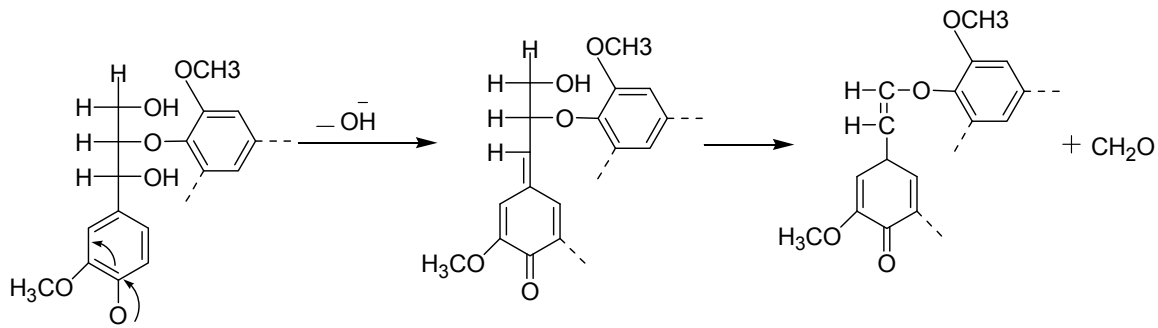
Figura 16. Ruptura de los enlaces β -O-4 en la lignina



(SAN JUAN, 1997)

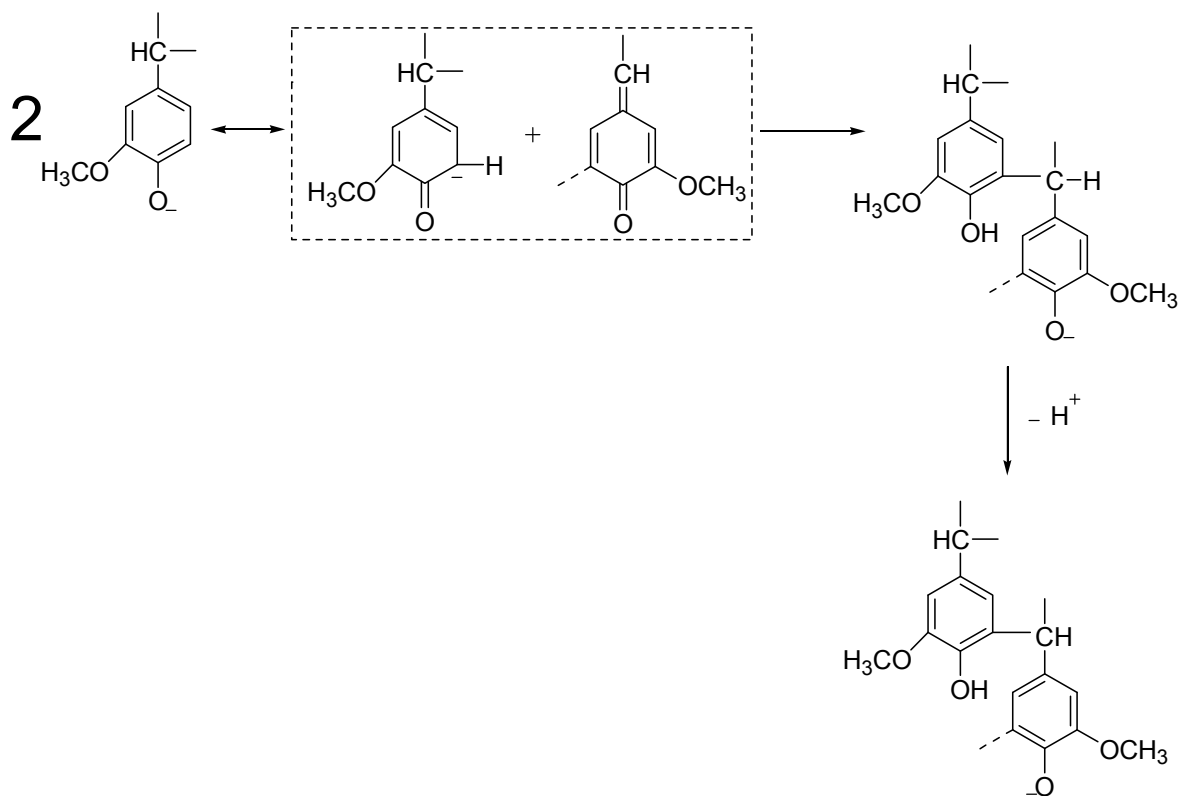
- *Estructuras fenólicas libres con enlaces β -O-4*. El primer paso de esta reacción involucra la formación de una metilén quinona del anión fenolato mediante la eliminación de un ión hidróxido, alcóxido o fenóxido del carbono α . En el proceso a la soda, la reacción dominante es la eliminación del grupo hidroximetilo de la metilén quinona con la formación de formaldehído y una estructura éter estiril arilo sin ruptura del enlace éter del carbono β .

Figura 17. Formación del intermediario metilén quinona



(SAN JUAN, 1997)

Figura 18. Formación de condensación de enlace α-5



(SAN JUAN, 1997)

- *Reacciones de Condensación*. Mientras los enlaces éter de la lignina se rompen eficientemente bajo las condiciones de pulpeo alcalino, la formación de estructuras condensadas disminuye tanto la reactividad como la solubilidad de la lignina residual. Este fenómeno interfiere seriamente con la acción de remover completamente la lignina y con la velocidad de deslignificación, especialmente durante la etapa final de la mayoría de los procesos de pulpeo.

1.6 DESEMPEÑO DE LA ANTRAQUINONA

El éxito de todo proceso redox que ocurre durante la cocción y bajo influencia de un catalizador, depende de que el aditivo presente las siguientes propiedades:

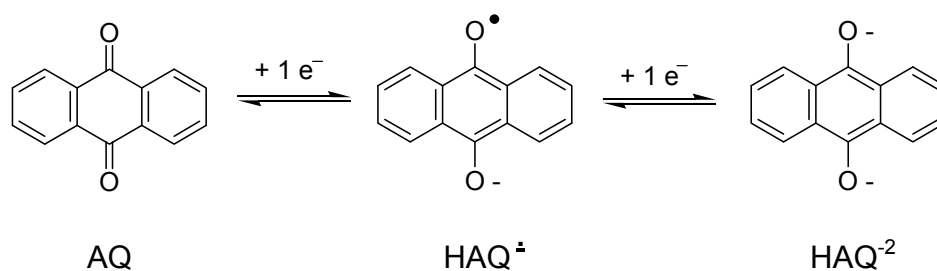
- Estabilidad en un medio fuertemente alcalino y de temperatura elevada.
- Sensibilidad a ser reducido por los grupos aldehídos de los polisacáridos; de esta manera, adopta una forma que degrada las estructuras activas de la lignina.
- Solubilidad de su estado reducido en el medio alcalino.
- Cero grado de toxicidad en su impacto sobre el medio ambiente.
- Bajo costo de inversión.

La antraquinona (AQ), es un agente químico que reúne las propiedades previamente mencionadas. Su actividad fue estudiada principalmente por Holton, quien en 1977 patentó el proceso de soda-AQ, en el que establece la adición del catalizador al licor de digestión para generar pulpas con propiedades semejantes a las del proceso al sulfato a partir de maderas blandas.

La AQ existe en varios estados de oxidación durante el pulpeo: inicialmente la forma oxidada AQ es insoluble en el licor de cocción, de este modo no posee ninguna función catalítica. Para ser efectiva, cada molécula de AQ debe estar libre e independiente para interactuar con partes activas de la lignina que son producidas o expuestas por el licor de pulpeo. La solubilidad de la AQ llega a ser posible por medio de una reducción electroquímica, en la primera etapa de la digestión aproximadamente a 100°C, dando una solución roja oscura. Este color es producido por la forma semiquinona parcialmente oxidada, el anión radical hidroantraquinona ($\text{HAQ}^{\cdot-}$); y la forma completa reducida, el dianión hidroantraquinona (HAQ^{2-}).

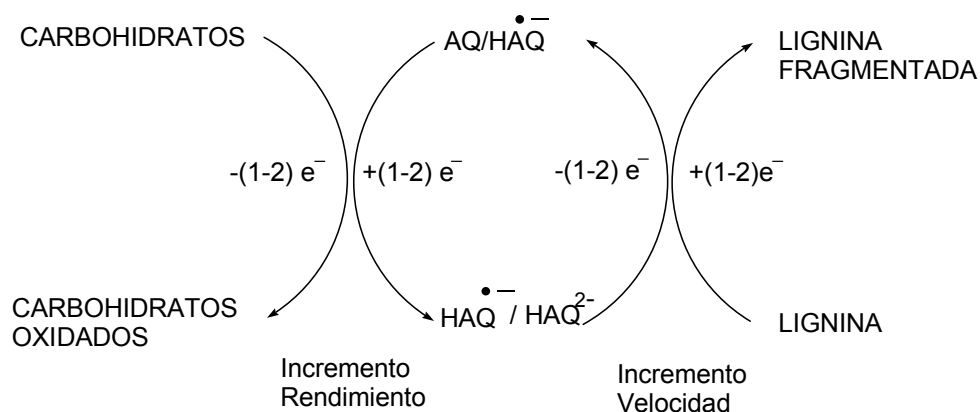
En cocciones alcalinas con AQ se propone que este agente químico actúa como catalizador en un ciclo redox, donde la AQ o HAQ oxida los grupos terminales aldehído, disminuyendo la extensión de la degradación alcalina de los carbohidratos y formando el dianión HAQ^{2-} . La posterior reacción con la lignina causa la fragmentación de este polímero y la oxidación de la HAQ^{2-} regresando a AQ o HAQ anión radical.

Figura 19. Estados de oxidación de la AQ



(DIMMEL, 1996)

Figura 20. Ciclo redox de la AQ



(DIMMEL ,1996)

Como las dos semirreacciones del ciclo redox no suceden al mismo tiempo y temperatura, pues la estabilización de los carbohidratos se da en la primera etapa del proceso cuando la temperatura es baja, mientras que la mayor parte de la deslignificación ocurre solo al final cuando la temperatura máxima ha sido alcanzada, se sugiere que la ruta probable para generar la HAQ necesaria para que este ciclo redox se repita es la interacción de la AQ con los polisacáridos disueltos en la reacción de ruptura de cadena y en la estabilización subsiguiente de nuevos terminales reductores (acortamiento secundario).

Cuando se añade AQ al licor de soda se llevan a cabo todas las reacciones antes enunciadas pero en algunas se presentan ciertas modificaciones. Entre las reacciones de degradación se encuentran:

a. Reacción de Peeling. La AQ no altera esta reacción, pero sí la desfavorece por la producción de ácidos aldónicos a partir de la celulosa y hemicelulosa, que son, comparativamente, más estables con respecto a la degradación alcalina.

b. La ruptura de enlaces glucosídicos se reduce en un 60% por la adición de este catalizador.

Además, entre las reacciones de frenado tiene lugar la oxidación del grupo terminal hemiacetal a ácido aldónico y ácido metasacaránico, existiendo, por tanto, dos reacciones de frenado en el proceso con AQ.

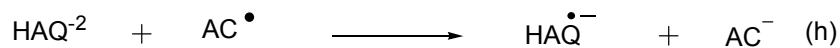
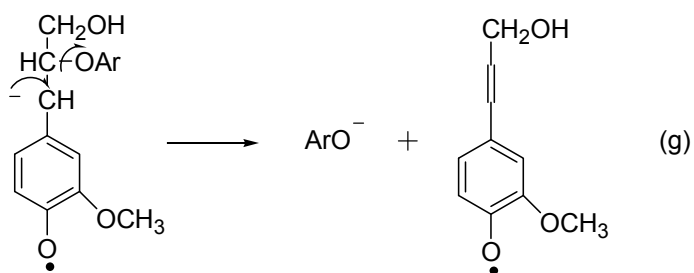
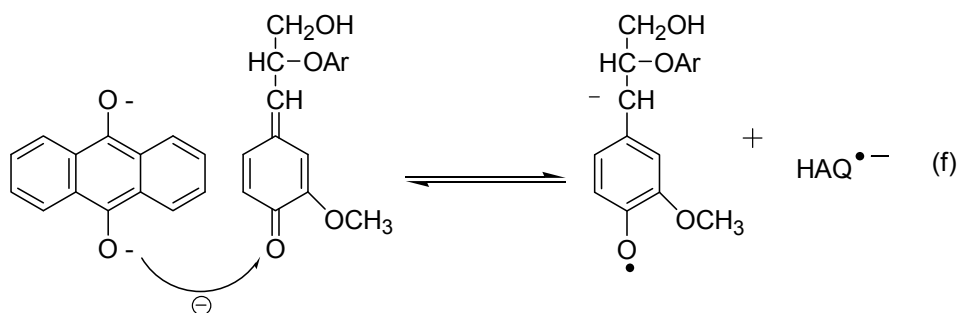
Se debe tener en cuenta que al agregar AQ a las cocciones alcalinas se presenta la ruptura de enlaces glucosídicos y se suprime, en parte, la reacción de acortamiento debido a las dos reacciones de frenado. Además, la forma reducida de la AQ reacciona directamente con el intermediario metilén quinona compitiendo efectivamente con la formación del indeseado éter vinílico. Todo esto se traduce en un mayor rendimiento de pulpa y mayor deslignificación.

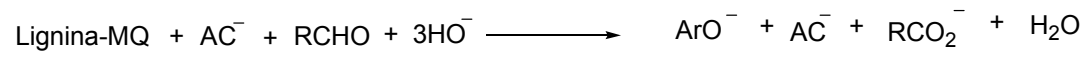
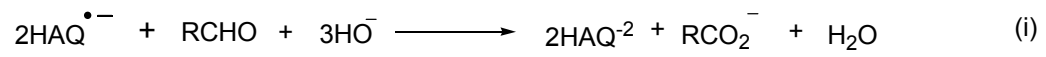
En el mecanismo de reacción presentado a continuación se plantea que el rompimiento clave es la degradación de la lignina por la AQ, ocurre en el enlace β -O-4 éter de las unidades fenólicas libres presentes en la lignina nativa y en los fragmentos formados durante el pulpeo. Inicialmente, hay una transferencia de un electrón a partir de la HAQ^{-2} a la metilén quinona (ecuación f). El anión radical metilén quinona resultante se rompe en un ión y en un fragmento radical (ecuación g). Este último recupera un electrón a partir de otra molécula de HAQ^{-2} para dar un segundo ión fenolato (ecuación h). El dianión HAQ^{-2} se regenera cuando un carbohidrato se oxida a un ácido aldónico por interacción del anión radical HAQ^{\cdot} . La suma de estas ecuaciones (ecuación i), indica que los electrones son transferidos por los iones HAQ solubles a partir de los carbohidratos a la lignina, causando la oxidación de los primeros a unidades terminales de ácidos carboxílicos, relativamente estables; y, que el segundo se reduzca, llevando a cabo su fragmentación y solubilización. Los dos efectos explican el aumento del rendimiento de la pulpa y las altas velocidades de deslignificación en la digestión.

De esta manera, se plantea al mecanismo SET (single electron transfer) como la ruta más consistente en la química del pulpeo soda-AQ.

El mecanismo propuesto envuelve la interacción de la antraquinona con el alcohol coniferílico; por tanto, se plantea que la reacción se lleve a cabo de igual forma para los demás estructuras que conforman la macromolécula de lignina.

Figura 21. Mecanismo SET de la antraquinona.





AC: alcohol coniferílico. (DIMMEL, 1996).

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 GENERALIDADES

La viabilidad del raquis de la palma africana como fuente de pulpa celulósica se determinó realizando ensayos a escala de laboratorio y analizando las respectivas propiedades de respuesta del material. El método consistió en someter el material vegetal, según los resultados obtenidos del análisis químico, a los procesos de cocción a la soda y soda-AQ.

Después se evaluó el rendimiento y el número kappa de la pulpa obtenida para estudiar la eficiencia del proceso de digestión. Posteriormente, la pulpa se sometió a un tratamiento mecánico, se valoraron los parámetros físico-mecánicos de las hojas formadas de acuerdo a las normas internacionales TAPPI y UNE, con el fin de seleccionar las mejores condiciones que permitan obtener un material apto para el proceso de blanqueo y para ser combinado con material reciclado para la producción de cartón.

2.2 PREPARACIÓN DEL MATERIAL.

La materia prima fue suministrada por la empresa Palmas del Cesar (San Alberto) al grupo de investigación CICELPA (Bucaramanga). Las hojas se cortaron en el momento de retirar el fruto de la planta, se retiraron los folíolos y las espinas para tener libre finalmente el raquis. Cuando se tuvo el material reunido, se sometió posteriormente al proceso de reducción de tamaño, en el cual el raquis fue astillado y molido en un desintegrador y picador de cuchillas y martillos marca Cremasco modelo DP-4 de 16HP. El material se secó al aire y se tamizó.

En este proceso se separó la parte fibrosa del raquis y el parénquima. Los materiales separados se almacenaron en bolsas de poliestireno para mantener invariables sus propiedades.

Para el análisis químico se tomó 1000 g del material previamente cribado, se molió en un molino de cuchillas y martillos; marca WBG de 12.5HP, 3510 rpm y criba de 0.3 cm. El material resultante se pasó por tamices TAPPI # 20, 40, 60, 80 y 100. Se tomó la parte que pasó la malla 40 y quedó retenida en la malla 60 para la realización de las pruebas siguientes.

- **Determinación de Humedad.** Todo material fibroso contiene cierto grado de humedad, que se determina por diferencia de peso al colocar una porción de fibras previamente pesadas en una estufa a 105°C hasta que alcance un peso constante o peso seco. Se expresan los resultados como porcentaje de humedad.
- **Determinación de solubles en agua fría/caliente.** Indica la cantidad de sales orgánicas, taninos, gomas, carbohidratos, pectinas y pigmentos que afectan el rendimiento y consumo de reactivos. El agua caliente hidroliza los polisacáridos. Se expresan los resultados como porcentaje de material soluble en agua fría o caliente en base seca.
- **Determinación de solubles en NaOH al 1%.** Permite conocer el contenido de material de bajo peso molecular que se encuentra en las fibras. Cuando la materia prima está expuesta al aire, representa el avance por degradación de hongos mediante una disminución en el rendimiento. Los resultados se expresan como porcentaje de solubles en NaOH en base seca.

- **Preparación del material libre de extraíbles.** Consiste en extraer de la muestra aquellas sustancias solubles en solventes neutros, mediante un tratamiento continuo con alcohol-benceno, alcohol y agua caliente. De esta manera, se prepara el material para las determinaciones faltantes.
- **Determinación de Lignina + cenizas.** Conocer la cantidad de lignina que contiene la materia prima permite fijar las condiciones para una adecuada digestión de las fibras. La determinación se expresa como porcentaje de lignina en base seca.
- **Determinación de Celulosa + cenizas.** Es la prueba más importante. Cuantifica la cantidad de celulosa contenida en la fibra, cuya presencia es imprescindible en el proceso de fabricación de papel. Los resultados se expresan como cantidad de celulosa en base seca.
- **Determinación del contenido de cenizas.** Indica el grado de material inorgánico (sales minerales) que se encuentra en las fibras. El residuo resultante de la ignición corresponde a las cenizas, que a mayor cantidad representa problemas de corrosión en el reactor y contaminación de reactivos y catalizadores.
- **Determinación del contenido de Hemicelulosa.** Indica el contenido de carbohidratos de bajo peso molecular extraíbles por agua o álcali a partir de la materia prima. Mediante los resultados obtenidos anteriormente, se determina el porcentaje de hemicelulosa presente, considerando la siguiente relación:

$$\% \text{ Hemicelulosa (bms)} = 100 (\text{libre de extraíbles}) - \% \text{ cenizas} - \% \text{ celulosa (bms)} - \% \text{ lignina (bms)}$$

Finalmente, cada resultado se expresa como un valor promedio de tres mediciones.

Tabla 1. Normas empleadas en el análisis químico.

Análisis Químico	Método
Humedad	T18m-59
Solubles en soda al 1%	T4m-59
Solubles en agua caliente	T1m-59
Extraíbles, alcohol-benceno, alcohol	T12m-59
Lignina	Klason
Celulosa	K. Seifert
Cenizas	T15m-58

2.3 DIGESTIONES

La palma africana por su carácter no maderable presenta un bajo contenido de lignina reactiva y sus fibras gran facilidad de impregnación; por esta razón, la concentración de los reactivos requeridos fue menor que la empleada para el pulpeo de plantas maderables.

El material se trató mediante los procesos a la soda y soda-AQ, independientemente. Para ambos pulpeos se propone un diseño experimental basado en un criterio de comparación, donde se busca observar los efectos sobre las propiedades físico-mecánicas de las pulpas por la variación de los parámetros de cocción. Las variables consideradas son el tiempo de cocción, la temperatura de digestión y la concentración de antraquinona en porcentajes máxicos. Como parámetros fijos se establecen la relación de material fibroso-licor (1:8.5), la cantidad de material fibroso seco inicial (600g), la concentración de NaOH (15 %)

y el tiempo de elevación (60min). Como variables de respuesta se utiliza el rendimiento másico y el contenido de lignina en la pulpa (ambos porcentaje en base seca).

En total se programaron doce digestiones. Cada pulpa se obtuvo humectando la fibra previamente con 1600 mL de licor durante 20 minutos, luego se adicionó la cantidad de licor restante hasta completar el hidromódulo y se determinó el pH inicial del licor. La relación fibra–licor se estableció a partir de una digestión preliminar.

Terminada la etapa de mezcla entre el licor y el material, se inició la respectiva cocción. El seguimiento de este proceso se realizó valorando el consumo de soda y el pH del licor de digestión.

Finalmente, se determinó el rendimiento de la pulpa y el número kappa, mediciones que permiten conocer el grado de conservación de la integridad de las fibras y el alcance de la deslignificación durante las digestiones.

Tabla 2. Proceso a la soda

Digestión No.	Temperatura de digestión	Tiempo de cocción
5	150 °C	120m
3	150 °C	150m
7	160 °C	120m
2	160 °C	150m

Tabla 3. Proceso a la soda-AQ

Digestión No.	Concentración AQ	Temperatura digestión	Tiempo cocción
6	0.05%	150 °C	120m
4	0.05%	150 °C	150m
8	0.05%	160 °C	120m
1	0.05%	160 °C	150m
9	0.1%	150 °C	120m
10	0.1%	150 °C	150m
11	0.1%	160 °C	120m
12	0.1%	160 °C	150m

2.4 DESFIBRADO

Se tomó 360 g de pulpa secada a temperatura ambiente y se adicionó a 16 L de agua. Esta suspensión se desfibró en un equipo (desfibrador-refinador) marca Sprout Waldron, ajustando la separación entre los discos a 100, 80, 60, 40, 20, 10 y 7 milésimas de pulgada, para lograr un material con un grado de refino próximo a 500 CSF.

2.5 REFINO

Se recogió la suspensión proveniente del desfibrador y se realizó el refino en el equipo tipo Holandesa Valley Beater. A medida que avanzó el proceso, se tomaron tres puntos de referencia a 500, 400 y 300 CSF donde se retiró una cantidad de pulpa necesaria para elaborar hojas con un gramaje de 60 g/m² y 135 g/m². Esta etapa se controló mediante el Método de Canadian Estándar Freeness (CSF), que mide la facilidad con que se drena el agua a través de una hoja formada.

Tabla 4. *Propiedades Físico-Mecánicas*

Propiedad físico-mecánica	Norma
Peso base	T410 os –68
Espesor o Calibre	T411 os76
Corte de hojas	T220 m-53
Resistencia al Estallido	UNE 57-058-74
Resistencia a la Tensión	UNE 57-028-79
Resistencia al Rasgado	UNE 57-033
Resistencia al dobléz	UNE 57-054-78
Blancura	T217m-48
RCT	T-818
CLT	UM T-801
FCT	UM T-805
CMT	T-809

Después de elaborar las hojas, se secaron a temperatura ambiente y se acondicionaron en un cuarto. Posteriormente, se evaluó las propiedades físico-mecánicas para pulpa, liners y papel onda, citadas en la tabla 4.

2.6 BLANQUEO

Se procedió a blanquear, según la secuencia HEHP, la pulpa con número kappa 65,4, elaborada bajo las condiciones de operación de la digestión 11 mediante el proceso soda-AQ, con el fin de fortalecer las cualidades de resistencia; además, se tuvo en cuenta que para esta pulpa se alcanzó el mayor grado de deslignificación sin alta pérdida de rendimiento.

Tabla 5. Condiciones de blanqueo para los ensayos.

Ensayo		1	2	3
Hipoclorito (H)				
% Cl ₂ total b.m.s		24	24	23
% Cl ₂ etapa 1		65	70	75
Tiempo		180 min	90 min	90 min
Temperatura		ambiente	60°C	60°C
pH	Inicial	11	11	11
	Final	9	9	9
% consistencia		10	8	8
% NaOH		4	3	4
Extracción alcalina				
% NaOH (E)		3	3	2
% consistencia		5	5	5
Tiempo		1 h	1 h	1 h
Temperatura		60°C	60°C	60°C
Hipoclorito (H)				
% Cl ₂ etapa 2		35	30	25
Tiempo		7 días	150 min	90 min
Temperatura		ambiente	60°C	60°C
pH	Inicial	11	11	11
	Final	9	9	9
% consistencia		10	6.5	8
% NaOH		2	3	3

En los ensayos se realizó solo la etapa HEH, ya que esta etapa inicial requiere mayor control del avance de la reacción de designificación de la pulpa, además del grado de blancura alcanzado en el proceso. Estas pruebas preliminares se

llevaron a cabo con pequeña carga de pulpa y los parámetros temperatura, tiempo y consistencia fueron variados, con el fin de evaluar el proceso. Igualmente, se fijaron según la literatura consultada.

Basados en los resultados de la prueba de número kappa, consumo de reactivos y grado de blancura obtenidos de estos ensayos, las condiciones más favorables se ajustaron, mientras que los parámetros y manipulación del peróxido de hidrógeno en la etapa final del blanqueo se establecieron según lo reportado en la literatura. Finalmente, el blanqueo se aplicó a la pulpa seleccionada.

Tabla 6. Condiciones definitivas del blanqueo.

<i>Cl₂ total b.m.s</i> 24%	<i>Etapa 1</i>	<i>Extracción</i> <i>Alcalina</i>	<i>Etapa 2</i>	<i>Etapa 3</i>
<i>% Cl₂</i>	75	-	25	-
<i>Tiempo (min)</i>	120	60	180	240
<i>Temperatura (°C)</i>	50	60	60	75
<i>pH</i>	11-10,5	-	11-10,5	10,5
<i>%Consistencia</i>	8	8	8	10
<i>%NaOH</i>	3	2	3	1,5
<i>%Peróxido</i>	-	-	-	2

En la etapa tres se adicionó silicato de sodio (2,5%), sulfato de magnesio (0,05%), DTPA (0,2%), molibdato de amonio (5%), que actúan como agentes quelantes.

Finalizado el proceso de blanqueo, la pulpa se neutralizó en una solución de bisulfito de sodio hasta alcanzar un pH 5, durante 15 minutos.

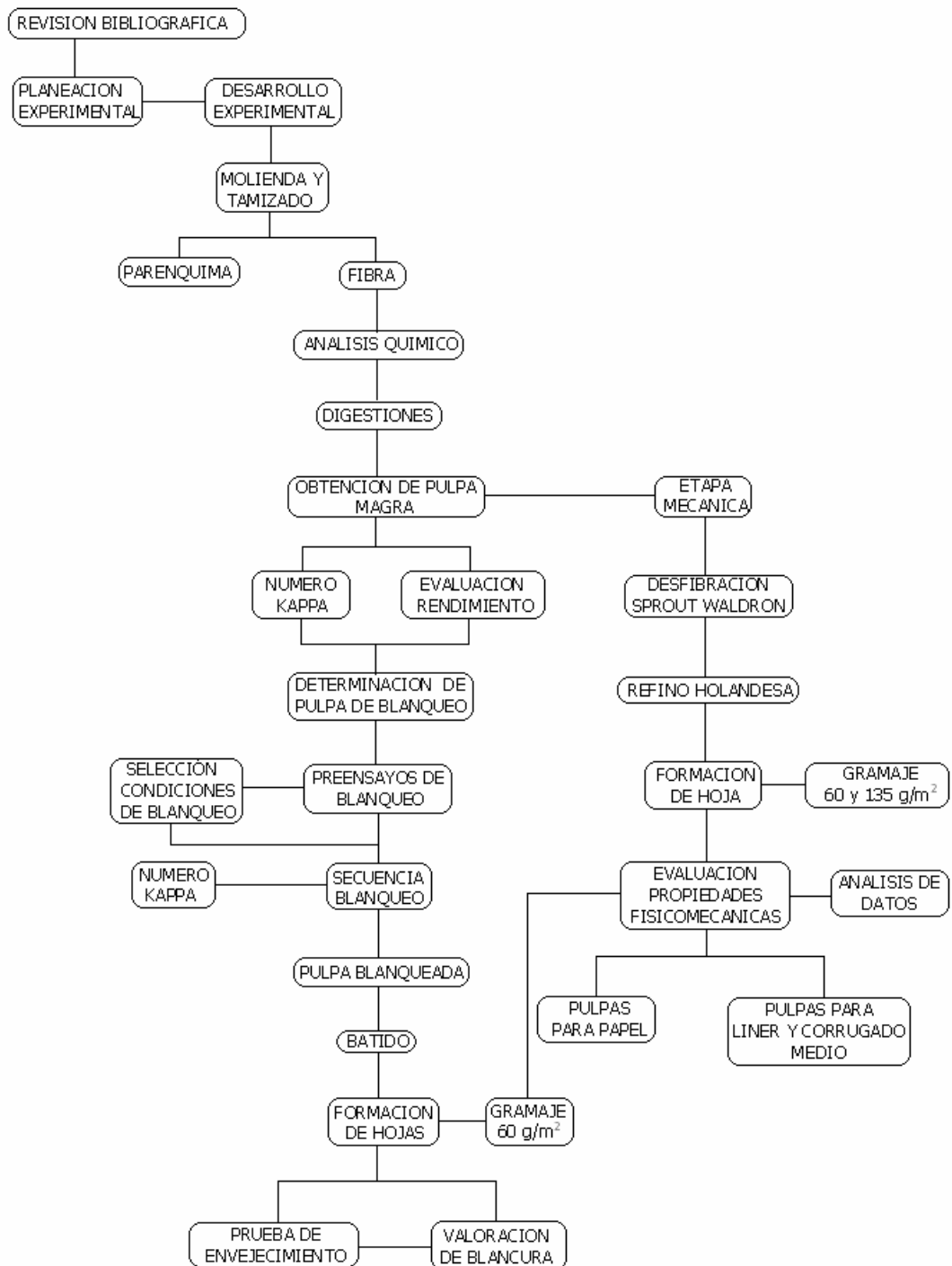
Por último, se determinó el rendimiento del proceso y se elaboraron hojas con gramaje de 60 g/m², después de llevarlas a un grado de refinado de 400 CSF. Las

hojas se emplearon para evaluar las propiedades físico-mecánicas para pulpas, el grado de blancura y envejecimiento de las mismas.

2.7 DIAGRAMA DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología de este trabajo se llevó a cabo de acuerdo al diagrama general mostrado en la siguiente figura.

Figura 22. Diagrama general de la metodología experimental.



3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 ANALISIS QUÍMICO

El contenido de material extraíble en NaOH al 1% fue menor, en comparación con el de las plantas anuales; sin embargo, sus porcentajes no deben despreciarse puesto que a partir de este valor se puede establecer que hay un fácil acceso y degradación de la pared celular del material por álcali diluido, así como la fácil eliminación de los productos de degradación por la acción de microorganismos y hongos. Por tanto, debe ser usada una carga baja o moderada de álcali con el fin de preservar la celulosa, teniendo presente la cantidad de sustancias extraíbles existentes en la fibra que también consumen reactivos durante el pulpeo. Además, este resultado se asocia con la pérdida en el rendimiento final de las digestiones.

Los solubles de la fibra del raquis de la palma africana en agua caliente y en alcohol-benceno fueron menores en comparación con la cantidad extraída de las plantas anuales. Estos moderados valores revelan la presencia de polisacáridos y fenoles (lignina, taninos, pigmentos) así como el efecto del parénquima y porosidad del tejido, que permiten un fácil acceso de los reactivos, lo cual se refleja en el consumo de álcali. Si estas sustancias no son en su mayoría eliminadas de la pulpa, pueden causar problemas en el refino y elaboración de las hojas.

El raquis de palma africana presenta mayor contenido de hemicelulosas que las plantas anuales. Esta determinación da una idea de la influencia de este material en el consumo de álcali, porque la fracción de hemicelulosas es más susceptible al ataque del licor. Además, no se descarta que su presencia en el refino beneficie la acción mecánica, por permitir mayor hidratación en las fibras.

Pese al menor contenido de celulosa encontrado en el raquis de la palma africana frente a las distintas materias primas, se observa que la holocelulosa se presenta en gran proporción, compensando la diferencia y permitiendo el uso de estos desechos agrícolas como fuente de fibra celulósica. Además, el bajo contenido de lignina de la fibra, muy cercano al de maderas duras, justifica la revisión del proceso de cocción mediante el análisis de la variación de las condiciones de operación.

El contenido de cenizas del raquis de palma africana se ubica por debajo del encontrado para el raquis de palma de Sudan, se puede considerar que está a un nivel medio-alto. (KHRISTOVA, KORDSACHIA, KHIDER, 2005). La presencia de estos minerales se relaciona con el efecto abrasivo experimentado en las tuberías y equipos de trabajo.

Los resultados del análisis químico realizado al raquis de la palma de aceite se resumen en el anexo A.

3.2 DIGESTIONES

Los principales efectos de la temperatura, concentración de AQ y tiempo de tratamiento sobre el grado de deslignificación y rendimiento se muestran en los anexos B y C.

Dentro de los límites del estudio, el rendimiento está en el rango de 58,1-64,3%, el cual es característico para pulpas semiquímicas de materiales no maderables, que se encuentra entre el 60-80%, de acuerdo a reportes de la literatura (SAN JUAN, 1997).

Se puede notar que la carga de AQ tiene la mayor influencia sobre el grado de deslignificación, seguido de la temperatura de cocción. A condiciones constantes de temperatura y tiempo, el aumento de la concentración de AQ induce a mayor deslignificación, lo cual se atribuye al efecto redox del aditivo sobre los componentes del material, donde el incremento de moléculas de AQ permite la interacción con un mayor número de sitios activos de la lignina, aumentando la fragmentación de este polímero. A su vez, un aumento de la temperatura favorece la velocidad de deslignificación para condiciones constantes de concentración de AQ y tiempo, excepto para 0% de AQ y 120 minutos. La elevación de este parámetro permite que las especies reaccionantes en el sistema alcancen la energía suficiente para iniciar la reacción de deslignificación; en consecuencia, el contenido de lignina residual es menor una vez termina el tiempo de digestión.

En la figura del anexo C-1 se representa el comportamiento de la deslignificación descrito previamente, bajo la influencia de la antraquinona. Se hizo un ajuste lineal, cuya pendiente representa la razón de cambio en el grado de deslignificación con respecto a la concentración de la antraquinona agregada.

Por otra parte, aunque la diferencia entre los rendimientos es pequeña, se observó que a condiciones constantes de temperatura y porcentaje de AQ, las pulpas obtenidas con menor tiempo de cocción presentan rendimientos ligeramente superiores a aquellas sometidas a mayor tiempo, lo cual significa que se presenta pérdida de rendimiento por mayor disolución de lignina, hemicelulosas y extraíbles a partir de la fibra. La AQ permitió controlar el rendimiento, aunque hubo mayor deslignificación; se considera que se preservó el material fibroso. Este cambio también se observa con la temperatura, aunque su influencia no es muy significativa sobre este parámetro. Además, los rendimientos alcanzados para el proceso soda-AQ son comparables con los obtenidos para el raquis de palma africana en el proceso Kraft, que osciló entre el 50-62%. (CACERES, 1978)

Para todas las digestiones en general, en el período inicial de cocción (60 minutos) se consumió un gran porcentaje de álcali en las reacciones de neutralización de los ácidos derivados de los polisacáridos, ácidos orgánicos presentes en las fibras, productos de degradación de la lignina y reacción con los compuestos extraíbles. Mientras que un porcentaje muy bajo de álcali se requirió para extender la deslignificación durante el tiempo de cocción a temperatura máxima.

Tomando como referencia los valores de los números kappa para determinar el contenido de lignina residual de las pulpas después de las digestiones, se puede confirmar que los licores de cocción que contienen antraquinona presentan mayor poder deslignificante que los licores sin catalizador, porque al actuar con el raquis de la palma africana inducen a la mayor eliminación de este polímero.

Las características morfológicas del raquis de la palma africana no indicaron serios problemas para la penetración e impregnación del licor. Además, el hidromódulo (1:8.5) empleado permitió la recirculación del licor de manera uniforme durante la digestión, reflejándose en la ausencia de material no cocido.

3.3 PROPIEDADES FISICO-MECANICAS

Los tres parámetros empleados como variables para analizar el proceso soda-AQ, junto con el refinado ejercen influencia sobre las propiedades de resistencia (reportados en los anexos D, E, F, G) de la siguiente manera:

3.3.1 Propiedades físico-mecánicas de pulpas para papel

Es interesante observar que la AQ es la principal encargada de acelerar la deslignificación; sin embargo, se tiene que a un mismo grado de refinado y un tiempo

corto de cocción, las resistencias a la tensión, explosión y doblez alcanzaron sus mejores valores a un nivel de 0,05% de AQ y una temperatura máxima de 150°C; de igual forma, bajo este mismo porcentaje de catalizador y temperatura, las hojas experimentan mayor resistencia al rasgado, explosión y doblez, a un tiempo de exposición mayor de 150 minutos. Por otro lado, a una temperatura máxima de 160°C, se presentó que las propiedades de resistencia desarrollaron sus mayores valores en presencia de 0,1% de AQ en los tiempos de 120 y 150 minutos, respectivamente.

El efecto positivo del aumento de la temperatura a 160°C se presentó en conjunto para las propiedades a condiciones de 0,1% de AQ y tiempo de cocción de 150 minutos.

Se observó que en la mayoría de los datos al compararse a condiciones de temperatura y concentración de AQ constantes, el aumento del tiempo condujo al incremento en la resistencia física de las hojas lo cual se atribuye que a mayor exposición de este material al proceso de pulpeo, se fomenta la limpieza de las fibras permitiendo mejorar la interacción y los enlaces interfibrilares, generando pulpas más resistentes.

Al observar el comportamiento de la resistencia al rasgado de las hojas de pulpa, en algunos casos se encontró que la propiedad aumentó en el punto intermedio de refino (400 CSF); en cambio, el último (300 CSF), presentó una caída. Inicialmente, la fibra menos refinada forma uniones interfibrilares débiles, por tanto, la hoja experimenta un menor trabajo para rasgarla; por el contrario, al dar cierto grado de refino su unión interfibra se incrementa y como la resistencia friccional al separar estas fibras en la hoja aumenta, el índice de rasgado es mayor. Sin embargo, en pulpas excesivamente refinadas (bajo CSF), las fibras ya no se deslizan fácilmente entre sí; es decir, por la refinación de la hoja aumenta su

cohesión interfibrilar y rigidez, lo que ocasiona que la resistencia al rasgado se concentre en una zona más pequeña de la hoja, obteniéndose finalmente valores más bajos de rasgado.

La resistencia a la tensión, explosión y doblez para todas las pulpas aumentó al avanzar el grado de refino. Estas propiedades dependen tanto de la longitud de la fibra como del número de uniones entre ellas. Con el aumento del refino se incrementa el número de uniones. De este modo, la hoja forma una red de mayores puntos de contacto y mejor organización estructural. Así, esta red puede soportar a través de todos sus puntos el esfuerzo o presión aplicada durante la evaluación de las pruebas para que la hoja no se rompa; de ahí, la importancia de la formación de la hoja y su uniformidad.

En lo que respecta a los valores de los volúmenes específicos, éstos disminuyeron con el aumento en el grado de refino, lo cual es debido al incremento de uniones interfibrilares inducidas por el hinchamiento y que generan hojas de pulpa más compactas.

3.3.2 Propiedades físico-mecánicas de pulpas para inserción en cartón corrugado.

A una temperatura máxima de 150°C, un tiempo de cocción de 150 minutos y a un mismo grado de refino, se encontró que con 0,1% de AQ se alcanza el desarrollo de la mejor resistencia en las propiedades CMT, CLT y RCT. A igual temperatura y un tiempo de digestión de 120 minutos, la pulpa con 0,05% de AQ presentó la mejor resistencia en la propiedad CFC, mientras que con 0,1% de AQ se incrementó la resistencia en la propiedad CLT.

Al aumentar la temperatura máxima de digestión de 150 a 160°C, comparando a un mismo porcentaje de AQ y grado de refino, se observó que las hojas elaboradas con 0,1% de AQ presentaron un efecto positivo, mejorando su resistencia física en las propiedades CMT, CFC y RCT a un tiempo de digestión tanto de 120 como de 150 minutos.

Al incrementar el tiempo de digestión para una temperatura máxima de 150°C, se observó que a una misma concentración de AQ se favoreció la propiedad CFC de las hojas de pulpa, y la propiedad CMT sólo se incrementó con una concentración de 0,1% de AQ. Por otra parte, a una temperatura de 160°C el aumento del tiempo de digestión a 150 minutos, realzó las propiedades físicas de CMT, CLT, CFC y RCT con 0,1% de AQ. Esta pulpa presentó uno de los mejores grados de deslignificación y aunque no fue el más alto, se considera que este contenido de lignina residual fue el que aportó en su mayoría a la termoplasticidad de las hojas en las pruebas de liner ondulado, permitiendo la formación de la onda sin romperse o debilitarse, y además contribuyó a la rigidez necesaria de los liners, en general, para obtener una buena resistencia física.

De acuerdo a los resultados, se observó que la resistencia de las hojas de pulpa en las pruebas CLT es muy baja en comparación con las demás propiedades. Esta propiedad para liner liso depende además del contenido de lignina, también de la longitud de la fibra. El raquis de palma africana posee una fibra de corta longitud que no favorece la resistencia física del liner, y por ello se observan estos resultados. En la prueba RCT se evalúa otra propiedad asociada con la resistencia del liner liso, obteniéndose mejores resultados para ésta en comparación con CLT; aunque en las dos pruebas la probeta utilizada tiene las mismas dimensiones y la fuerza de aplastamiento ejercida por el equipo es la misma, el área de contacto sobre la cual se efectúa la fuerza es mayor en RCT por tanto, se resiste un

esfuerzo externo mayor y se minimiza en parte el efecto de utilizar fibra corta sobre la resistencia del material.

El trabajo mecánico efectuado en el proceso de refino permitió desarrollar una mayor resistencia física en las hojas de pulpa frente a los esfuerzos aplicados a las probetas en las pruebas CFC, CMT y RCT. Durante el batido y refino de la pulpa, los haces fibrilares se abren, hay una disminución controlada de la longitud de la fibra y una separación de las mismas. Este proceso permitió que las fibras presentaran mayor interacción interfibrilar y una mejor distribución de las mismas durante el proceso de formación de las hojas. Por ello, al aumentar el refino de la pulpa su densidad aumentó con lo que se obtiene una hoja más compacta; esta característica en su reología favorece la resistencia final del material a los esfuerzos externos como en las pruebas CFC, CMT y RCT.

Las propiedades del papel ondulado, CMT y CFC, se favorecen con el uso de fibra corta proporcionando una excelente rigidez y una gran resistencia a la compresión en plano de las ondulaciones. Esta cualidad física de la fibra junto con el efecto de acortamiento logrado en el proceso de refino, permitieron desarrollar una alta resistencia en las hojas de pulpa.

3.3.3 Análisis del efecto del tratamiento químico y físico sobre las propiedades físico-mecánicas.

El estudio de las propiedades de respuesta frente a las variables del proceso proporciona la herramienta destinada a determinar las mejores condiciones del pulpeo. Considerando la heterogeneidad de los resultados presentados por la resistencia física de las hojas de pulpa consignadas en las tablas de propiedades, se busca dar algunas explicaciones tentativas de los cambios químicos y físicos que la materia prima ha experimentado durante el proceso.

Las fibras expuestas a una temperatura máxima de 150°C se pueden considerar sistemas inestables. El material está en un punto crítico bajo esta temperatura porque se encuentra finalizando fenómenos como la penetración y difusión de reactivos, el ablandamiento térmico de la interfase que contiene la lignina, la degradación de hemicelulosas que empieza a los 100°C, la neutralización de ácidos sacarínicos; por otro lado, se inicia el rompimiento de enlaces carbohidrato-lignina, la degradación química de la macromolécula de la lignina, la estabilización de la molécula fragmentada a través de la solvatación y fuerzas electrostáticas repulsivas. La permanencia del sistema en esta fase inestable influye en el daño físico y químico sobre las cadenas de celulosa y hemicelulosas, y en la distribución de la lignina y hemicelulosas residuales sobre las fibras, que a pesar de la deslignificación alcanzada intervienen en la interacción interfibrilar y, de este modo, disminuye la resistencia de las hojas. En cambio, al exponer el material a una temperatura de 160°C, el sistema ya ha superado esta fase crítica y promueve la velocidad de eliminación de lignina que, a su vez, favorece el desarrollo de dichas propiedades.

Cuando se trabaja con un sistema de múltiples variables no puede descartarse la posibilidad de la acción conjunta de las condiciones de pulpeo sobre la respuesta de las propiedades. En esta investigación, los agentes químicos (NaOH, AQ) son los únicos parámetros que tienen un impacto directo sobre la naturaleza química y física de la pulpa resultante. La temperatura puede considerarse como un acelerador de la reacción del álcali, disolviendo la lignina y los carbohidratos a partir de la materia prima. Esta es afectada, principalmente por la acción del álcali que causa la deslignificación, hinchamiento de la fibra e hidrólisis de los carbohidratos; mientras que por otro lado, la presencia de la AQ, induce la estabilización de carbohidratos y conservación del material. Además, también se notó que el tiempo permite mayor exposición de éste a las reacciones químicas que se estén desarrollando.

Otro aspecto importante en el desarrollo de las propiedades durante el refinado es la conservación de hemicelulosas de cadena corta durante el pulpeo. Aunque el proceso de cocción tiene como principal objetivo la eliminación de la lignina, es imposible evitar la pérdida de carbohidratos especialmente las hemicelulosas que tienden a presentarse en estado amorfo, propiciando el acceso y ataque del álcali. Por esto, la pérdida de resistencia presentada por las hojas de pulpa, puede atribuirse también a la disminución del contenido de este compuesto en el material. La importancia de las hemicelulosas durante el refinado radica en que su naturaleza altamente hidrolítica hace que las fibras absorban una gran cantidad de agua. Como consecuencia de este hinchamiento el material se hace más flexible, produciéndose en mayor escala la fibrilación y no el corte que tendría lugar si las fibras fuesen rígidas. Así, se aumentan las superficies de contacto formando enlaces fuertes entre fibras adyacentes durante el secado, intensificando las características mecánicas de las hojas.

La longitud de las fibras también es una cualidad importante que influye en la respuesta de las características físico-mecánicas de las hojas de pulpa. La longitud promedio de las fibras de un material en particular puede permanecer sin cambio durante el curso del pulpeo químico, mientras que el grado de enlaces de hidrógeno, el cual es limitado, puede depender, hasta cierto punto, del rigor del tratamiento químico o la extensión de la disolución de los constituyentes de las fibras. Esta relación longitud-grado de enlace, se vuelve complicada por el grado de polimerización del material celulósico o la resistencia mecánica inherente a las fibras.

Las características de la pulpa presentadas en este estudio fueron obtenidas de pulpas batidas, es decir, que han sido tratadas mecánicamente o refinadas. Un tratamiento mecánico puede mejorar el índice de tensión, explosión y doblez; también puede generar influencia en el rasgado tanto positiva o negativamente,

debido a los efectos esperados por la fibrilación y acortamiento de la fibra causado por el batido. Por esta razón, los efectos generados en el material por las variables durante el pulpeo pueden modificarse hasta cierto punto, dependiendo de los cambios experimentados por las pulpas durante el tratamiento mecánico.

Las propiedades físico-mecánicas obtenidas bajo las diferentes condiciones de digestión alcanzaron los mayores resultados en presencia de la antraquinona. Considerando el efecto del catalizador sobre el grado de deslignificación, se relaciona la mejora de las cualidades de resistencia con la disminución del contenido de lignina residual en la pulpa. La deslignificación facilita una mayor cohesión entre las fibras, incrementando de este modo el contacto y entrelazamiento cuando se encuentran adyacentes, mediante la formación de puentes de hidrógeno interfibrilares.

3.4 BLANQUEO

Considerando los resultados (anexo I) obtenidos de los ensayos, las condiciones definitivas del blanqueo se establecieron según lo siguiente:

- Se trabajó con un porcentaje de 24% de cloro total y se adicionó a una relación de 75% y 25% para la primera y segunda etapa respectivamente, procurando que en combinación con los demás parámetros de operación, se produjera un menor consumo de reactivo y mayor nivel de blancura.
- Como la proporción de hipoclorito es alta en la primera etapa, se redujo la temperatura a 50° C y se extendió el tiempo de reacción, con el fin de generar el menor ataque posible hacia los carbohidratos durante la acción deslignificante de este reactivo.

- La temperatura en la segunda etapa se mantuvo a 60° C como la aplicada en los ensayos preliminares, ya que la proporción del agente de blanqueo es menor que en la primera etapa; de este modo se buscó inducir el mayor ataque al contenido de lignina residual por parte del hipoclorito. Nuevamente, el tiempo se prolongó por el consumo lento del reactivo durante este periodo, llegando al punto en que no se observó cambio en la concentración del reactivo.

La selección y combinación de los parámetros de blanqueo HEH, condujeron a una mejor deslignificación, lo cual se reflejó en el alcance de una mayor blancura, pero sin mayor ahorro en el consumo. Igualmente, las condiciones aplicadas para el peróxido contribuyeron al incremento de esta propiedad óptica, permitiendo lograr una blancura final de 83,2.

La pérdida en el rendimiento observada para la etapa HEH es mayor en comparación con la obtenida por el peróxido. Esta diferencia se relaciona con la acción de dos agentes de blanqueo (hipoclorito, NaOH) sobre los componentes de la fibra y la limpieza de la misma, durante este período.

Pese al alto grado de blancura alcanzado por la pulpa mediante el proceso de blanqueo establecido, se observó que las propiedades físico-mecánicas perdieron resistencia frente a la pulpa morena. Aunque la reducción de las cualidades fue variada, presentándose en mayor grado (88,7%) para el dobléz y en menor grado (14,8%) para la tensión, no puede ignorarse el efecto adverso del blanqueo sobre las propiedades de las hojas de pulpa.

La pequeña diferencia observada en el contenido de lignina residual entre la secuencia HEH y la etapa de peróxido junto con el incremento en la blancura,

permiten establecer que el peróxido actuó como agente de blanqueo no deslignificante, reaccionando con los grupos carbonilos conjugados (“para” y “orto” quinonas, coniferaldehidos) para producir aldehídos y ácidos carboxílicos incoloros. Además, la influencia de esta conversión de grupos cromóforos a compuestos incoloros influye en la conservación de la blancura, contribuyendo a que no se presenten grandes pérdidas de esta cualidad óptica durante la prueba de envejecimiento realizada.

La pérdida de rendimiento para la etapa de peróxido fue alta frente a la leve eliminación de lignina que se presentó; por lo tanto, no sólo se llevó a cabo la inactivación de grupos cromóforos, sino también la limpieza de compuestos degradados en la etapa previa, además, de resinas e impurezas de distinta naturaleza.

Aunque se obtuvo un alto grado de deslignificación en la secuencia HEH, este logro no representa la totalidad en la pérdida del rendimiento reportado. Conociendo la mayor reactividad del hipoclorito que del peróxido hacia los carbohidratos y considerando la reducción de las propiedades de resistencia de las hojas de pulpa después del proceso de blanqueo, puede asociarse tal debilitamiento a una degradación de polisacáridos, producto de la interacción con este agente de blanqueo, que también provoca una reducción de rendimiento.

Durante la etapa de peróxido se utilizó una carga del 2% de reactivo, la cual es la aplicada a nivel industrial. Al finalizar esta etapa, se conservó un residual superior al 20% de la carga de peróxido inicial, cantidad sugerida para impedir el amarillamiento de la pulpa por efecto del álcali sobre los carbohidratos.

De acuerdo a los resultados de blancura para un tiempo de envejecimiento de 72 horas, se encontró que las hojas de pulpa presentaron pérdida de esta propiedad

a una velocidad de 1,396 grados de blancura/hora. Para el tiempo evaluado, se observó en general que las hojas presentaron una buena estabilidad química ante el proceso de envejecimiento acelerado el cual es producido por reacciones de oxidación que facilitan la degradación de la cadena celulósica originando el amarillamiento de las hojas. El uso de peróxido de hidrógeno en el proceso de blanqueo, generó una estabilidad del color; por ello, aunque las hojas fueron expuestas a un ambiente drástico, la blancura se preservó en alto grado.

4. CONCLUSIONES

Los datos de rendimiento y grados de deslignificación de las pulpas obtenidas con diferentes porcentajes de antraquinona, demuestran la importancia de este catalizador en la deslignificación y protección de los grupos terminales reductores de las cadenas de los carbohidratos del raquis de la palma africana. Bajo un mismo rango de consumo final de álcali, el número kappa decrece con la adición de la antraquinona, confirmando que este catalizador acelera la eliminación de lignina en este material. Además, el rendimiento varió levemente frente al incremento de la concentración de la antraquinona, lo que indica que durante el proceso a la soda, la materia prima pierde carbohidratos, mientras que la presencia del catalizador induce principalmente a la pérdida de la lignina.

La facilidad de eliminación de los componentes del material fibroso durante la cocción está relacionada con su localización en la pared de la fibra y la reactividad con el licor. Por lo tanto, se considera que la pérdida en el rendimiento de las digestiones se asocia con la disolución parcial o total de hemicelulosas y de los extraíbles, sustancias que se encuentran en gran proporción en este material. Además, el grado moderado de deslignificación alcanzado durante el proceso no justifica la disminución del rendimiento.

El desarrollo de cada propiedad de la pulpa en un proceso químico tiene una limitación propia, la cual es fijada por las características químicas y morfológicas de los elementos constituyentes de la materia prima y de las fibras individuales. Por esta razón, el incremento de una propiedad no siempre está en paralelo con el cambio de otras propiedades en la misma pulpa, comportamiento que se observó con frecuencia en los resultados reportados de las propiedades de pulpa para papel, liner y corrugado medio.

Las fibras del raquis de palma africana muestran los mayores grados de deslignificación al aplicarse una temperatura de cocción de 160°C y en presencia de 0.1% de antraquinona. También se aprecia que bajo estas mismas condiciones de operación y 150 minutos de digestión, se logró obtener una pulpa que presentó los mejores resultados en conjunto de las propiedades físico-mecánicas de pulpas tanto para papel como liner y corrugado medio para cartón.

Por naturaleza, las fibras del raquis de la palma africana son de corta longitud, por consiguiente, las pulpas no tendrán propiedades físico-mecánicas excelentes (CACERES, 1978). Sin embargo, fue posible que se encontraran interesantes similitudes al comparar las cualidades de resistencia obtenidas por la pulpa 12 con los resultados reportados por otros materiales (tabla H-1), que son considerados aptos para incursionar en la industria papelera por su conveniencia en la producción de pulpas y de mezclas para fabricar papel de imprenta y de escritura.

Las propiedades físico-mecánicas que evalúan la utilidad de una pulpa en combinación con otras fibras para producir cartón ondulado, presentan mejores valores en la digestión 12, con 0.1% de antraquinona. Para esta pulpa se obtuvieron las mejores características de resistencia en las propiedades CMT y CFC, las cuales la hacen más apropiada para su inserción en la fabricación del corrugado medio. Así mismo, con la valoración de las propiedades CLT y RCT, se obtuvieron los mejores valores, por tanto, es la pulpa más apta para su inserción en la producción de liner. Estos resultados se presentan con la intención de que en posteriores trabajos, los expertos en inserción de materiales tengan una opción más y mediante sus conocimientos en mezclas, combinen la fibra del raquis de la palma africana con otras materias primas, y, de este modo, alcancen los valores estándares de calidad industrialmente aceptados para las propiedades físico-mecánicas.

El raquis de la palma africana dio un rendimiento total del 31.11% al exponer la pulpa elaborada bajo una carga de álcali de 15% como NaOH, 0.1% de antraquinona, a la secuencia de blanqueo HEHP. Además, las propiedades físico-mecánicas de la digestión blanqueada fueron más bajas que las desarrolladas por la pulpa morena de referencia, lo cual puede atribuirse a alguna degradación de carbohidratos presentada durante el proceso de blanqueo. Por otro lado, la elección del peróxido como etapa final demostró que al aplicarse en este material influyó substancialmente al impedir la reversión de la blancura, pues la pérdida total en esta propiedad óptica fue de 7.45% al someterse a la prueba de envejecimiento.

5. RECOMENDACIONES

Para el raquis de la palma africana se considera técnicamente apropiado el proceso soda-AQ teniendo en cuenta como resultados aceptables los grados de deslignificación, los rendimientos y propiedades físico-mecánicas alcanzadas. Aunque se pudo notar la acción catalítica de la AQ sobre la eliminación de la lignina, no se logró un alto grado de blancura en la pulpa magra, lo que condujo a emplearse un proceso de blanqueo que implicó también el ataque del agente activo hacia la celulosa, llevando a la correspondiente pérdida en las propiedades de resistencia de la pulpa. Por consiguiente, se plantea considerar la utilidad de la pulpa morena como material sustituto de otras fibras en mezclas empleadas en la producción de cartón corrugado. Además, se recomienda operar con un porcentaje de 0,1% de AQ y una temperatura máxima de cocción de 160°C, ya que a condiciones menores no se observó mayor ventaja en la deslignificación y propiedades físico-mecánicas.

De la valoración de las propiedades físico-mecánicas de la pulpa blanqueada se encontró que la resistencia de las hojas disminuyó; a partir de estos resultados, se puede recomendar el empleo de ésta en inserciones de mezclas para la fabricación de top liner, cuya blancura en la superficie es de fundamental importancia para el buen aspecto en la presentación de cajas de cartón y cajas plegadizas.

Se sugiere la incursión de la pulpa magra en la producción de papeles ecológicos, donde el grado de blancura requerido no es alto y se emplean en la línea de papeles para escritura.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, en los que se considera la pulpa obtenida a partir del raquis de la palma africana como una fuente opcional para la elaboración de ciertos tipos de papeles, se propone

divulgar esta información tanto en la industria papelera como en el sector palmicultor los cuales en conjunto pueden beneficiarse con la explotación de este material de desecho.

BIBLIOGRAFIA

ALAEJOS, J.; LÓPEZ, F.; EUGENIO, M. E.; TAPIAS, R. Soda-anthraquinone, kraft and organosolv pulping of holm oak trimmings. En: Bioresource Technology, Vol. 97, N°11 (2006); p. 2210-2116.

ALTHOUSE, E.; ANDERSON, K.L.; HOULE, L.L.; TREBILCOCK, J.W.; JAIN, D.K. Hydrogen Peroxide addition to an EO stage-Epo technology: Part I. En: Bleaching: A Tappi Press Anthology of Published Paper. (1991); p. 302-305.

ARBIN, F.; SCHROEDER, L.; THOMPSON, N.; MALCOLM, E. Anthraquinone induced scission of polysaccharide chains. En: IPC Technical Paper Series, Vol. 89, N° 10 (1979); p. 1-4.

BLAIN, T. Antraquinone pulping: fifteen years later. En: Tappi Journal, Vol 76, No. 3 (1993); p. 137- 143.

BAUCHER, M.; HALPING. C.; PETIT, M.; BOERJAN, W. Lignin: Genetic Engineering and Impact on Pulping. En: Critical reviews in Biochemistry and Molecular Biology, Vol. 38, N° 4 (2003); p. 305 – 350.

BELAYACHI, L.; DELMAS, M. Sweet sorghum bagasse: A raw material for the production of chemical paper pulp. En: Industrial Crops and Products, Vol. 6, N° 9 (1997); p. 229-232.

CACERES, Hernán. Ensayos preliminares sobre la producción de pulpas papeleras a partir del raquis de la palma africana. Bucaramanga: s.n., 1978. 58 p.

-----; BAUTISTA, Javier. Evaluación de pulpas al sulfato obtenidas a partir del Eucalyptus Camaldulensis. Bucaramanga: s.n., 1975. 92 p.

CESPEDES, Elizabeth; ACEVEDO, Nydia. Estudio del comportamiento cinético de un proceso organosolv (agua-etanol-soda) para obtener pulpa a partir del bagazo de caña de azúcar: Parte I. Bucaramanga, 1999, 93 p. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

CHAI, X-S.; SAMP, J.; HOU, Q. X.; YOON, S. -H. and ZHU, J. Y. Possible Mechanism for Anthraquinone Species Diffusion in Alkaline Pulping. En: Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 46 (2007); p. 5245-5249.

CHINCHILLA, E.; FORASTIERI, V.; ROJAS, D. Cultivo No. 3: Palma de aceite. Estudio del proceso de trabajo y operaciones, perfil de riesgo y exigencias laborales en el cultivo e industrialización de la palma de aceite. En : Serie Técnica: Seguridad y salud ocupacional en la agricultura. N^o 11 (2004); p. 1-69.

DANG, Zheng. The Investigation of Carboxyl Groups of Pulp Fibers during Kraft Pulping, Alkaline Peroxide Bleaching and TEMPO-mediated Oxidation. Georgia, 2007. 206 p. Trabajo de doctorado (Químico y Biología Molecular). Georgia Institute of Technology. Facultad académica.

DIMMEL, D. R. Pulping with Anthraquinone: Fundamental Chemistry. En : TAPPI Pulping Conference. (1996: Nashville). Nashville: Institute of Paper Science and Technology, 1996. 7 p.

FEDEPALMA. Cultivos de palma africana en Colombia [online] Bogotá 2002. Abril-Mayo. URL:[http:// www.fedepalma.org](http://www.fedepalma.org)

FENG, Z.; ALÉN, R. Soda pulping of reed canary grass. En: Industrial Crops and Products, Vol. 14, N^o10 (2001); p. 31-39.

FLEMING, B.; KUBES, G.; MACLEOD, J.; BOLKER, H. Soda pulping with anthraquinone: a mechanism. En: Tappi Journal, Vol. 61, N^o6 (1978); p. 43-46.

FRANCIS, R.C. Hydrogen peroxide deslignification & brightening of chemical pulps. En: Bleaching: A Tappi Press Anthology of Published Paper. (1991); p. 413-419.

GARCIA, José. El proceso al sulfato. Publicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya. 1987. 193p.

GOMEZ, Didier; ROJAS, Emilse. Obtención y evaluación de pulpas semiquímicas al sulfito neutro a partir de la hoja de la palma africana. Bucaramanga, 2004, 89 p. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

GARGALLO, A. Mecanismo de estabilización de las sustancias resínicas liberadas de las fibras celulósicas en los procesos de la fabricación del papel. En: Investigación y Técnica del Papel. Vol. 52, N^o 4 (1977); p. 407-424.

GOMEZ, Didier; ROJAS, Emilse. Obtención y evaluación de pulpas semiquímicas al sulfito neutro a partir de la hoja de la palma africana. Bucaramanga, 2004, 89 p. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

HOLTON, H. Soda additive softwood pulping: a major new process. En: Pulper & Paper, Vol. 78, N^o10 (1977); p.19-24.

KHRISTOVA, P.; KORDSACHIA, O.; PATT, R.; KHIDER, T. and KARAR, I. Alkaline pulping with additives of kenaf from Sudan. En: Industrial Crops and Products, Vol. 15, N^o12 (2001); p. 229-235.

-----; KORDSACHIA, O.; KHIDER, T. Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. En: Bioresource Technology, Vol. 96, (2005); p. 79-85.

KHRISTOVA, P.; KORDSACHIA, O.; PATT, R.; KARAR, I.; KHIDER, T. Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. En: Industrial Crops and Products, Vol. 23 (2006); p. 131-139.

-----.; TISSOT, M. Soda-anthraquinone pulping of hibiscus sabdariffa (karkadeh) and calotropis procera from Sudan. En: Bioresource Technology, Vol.53, N^o4 (1995); p. 67-72.

.-----.; GABIR, S.; BENTCHEVA,S.; DAFALLA, S. Soda-anthraquinone pulping of sunflower stalks. En: Industrial Crops and Products, Vol.9 (1998); p. 9-17.

LANDUCCI, L. Quinones in alkaline pulping: characterization of an anthrahydroquinone-quinone methide intermediate. En: Tappi Journal, Vol. 63, N^o7 (1980); p. 95-99.

LIBBY, Earl. Obtención y tecnología sobre pulpa y papel. México D.F. : McGraw-Hill, 1976. 534p.

MARTÍNEZ, J. M.; REGUANT, J.; SALVADÓ, J.; FARRIOL, X. Soda-anthraquinone pulping of a softwood mixture: applying a pseudo-kinetic severity parameter. En: Bioresource Technology, Vol. 60 (1997); p. 161-167.

OBST, J.; LANDUCCI, L.; SANYER, N. Quinones in alkaline pulping β -ether cleavage of free phenolic units in lignin. En: Tappi Journal, Vol. 62, N^o1 (1979); p. 55-59.

OCAMPO DURAN, Álvaro. Las Palmas, una Estrategia de Vida Tropical. Universidad de los Llanos. Fundación Horizonte Verde. Villavicencio (Colombia). Abril-Mayo.2002.URL:<http://www.lead.virtualcentre.org>.

QUESADA, 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. asagrecia@grecia.infoagro.go.cr

REED, G.; DIMMEL, D.; MALCOLM, E. Nucleophilicities of selected Ions in Water at 195°C. En: J. Org. Chem, Vol. 58, N°8 (1993); p. 6372-6376.

RODRIGUEZ DE CACERES, Lilia. Métodos de análisis empleados en la industria del papel. Bucaramanga: s.n., 1978. 156p.

-----; CACERES, Hernán. Evaluación de pulpas semiquímicas a la soda fría obtenidas a partir del Guarumo (Cecropia Tessmannii) . Bucaramanga: s.n., 1978. 81 p.

SANJUAN DUEÑAS, Rubén. Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. Guadalajara: s.n.,1997. 293 p.

SEMINARIO BLANQUEO DE PULPAS QUIMICAS. (1°: 1978: Guadalajara). Curso intensivo sobre blanqueo con Hipoclorito. Barcelona: 1978. p. 21 – 25.

SEMINARIO DE PREPARACION Y REFINO DE PASTAS. (1°: 1979: Barcelona). Cátedra de tecnología papelera. Barcelona: CIPAGRAF, 1979. 353 p.

SMITH, D. The Demonstration of Electron-Transfer Reactions and their effect on model Lignin Condensation Reactions Under Alkaline Pulping Conditions. Wisconsin, 1986, 92 p. Trabajo de grado (Químico). Lawrence University.

STORGARD-ENVALL, C.; DIMMEL, D. Dissolving reactions of anthraquinone at high temperatures. En: IPC Technical Paper Series, Vol. 164, N°10 (1985); p. 1-20.

SUSS, H.; EUL, W.; HELMLING, O.; WECK, M. Semibleaching of kraft pulp using and hydrogen peroxide. En: Bleaching: A Tappi Press Anthology of Published Paper. (1991); p. 83-89.

TAPPI. Standards suggested methods technical association of the pulp and paper industry.

UNE. Unificación de Normas Españolas

VALDIVIESO, Luis Gabriel. Obtención de Pulpas a la soda en frío a partir de la hoja de Palma Africana, Blanqueo y Evaluación. Bucaramanga, 2003, 91 p. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

VALLEJO,G. ICA. Palma africana: manual de asistencia técnica 22. Programa de oleaginosa perennes. Regional 5: Centro experimental de Palmira.1978. p 25-53,67-97.

VAN LIEROP, B.; LIEBERGOTT, N.; TEODORESCU, G.; KUBES, G.J. Caustic Extraction, part I: Reaction Variables. En: Bleaching: A Tappi Press Anthology of Published Paper. (1991); p. 293-299.

ANEXOS

ANEXO A. Composición Química.

TABLA A-1. Composición química determinada del raquis de la palma africana.

Compuesto	%
Extraíbles	12,7
Lignina	15,1
Celulosa	35,4
Hemicelulosa	31,7
Cenizas en extraíbles	3,24
Cenizas libre de extraíbles	1,88
Cenizas totales	5,12
Solubles en agua caliente	7,54
Solubles en alcohol - benceno	2,80
Solubles en alcohol	5,63
Solubles totales y cenizas	16,0
Solubles en NaOH al 1%	29,0

TABLA A- 2. Comparación de la composición química con otras materias primas.

Compuesto	Sorgo	Maíz	Raquis palma Sudan	Madera blanda	Madera dura	Raquis palma Africa
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
	%	%	%	%	%	%
Material Inorgánico	2,02	11,81	6,7	0,59	2	5,12
Solubles en agua caliente	25,30	14,90	8,7	8,49	1,87	7,54
Solubles en NaOH 1%	52,1	47,60	25,6	22,91	19,69	29,0
Solubles en Alcohol – benceno	11,40	7	-----	5,83	1,17	2,80
Soluble en Alcohol	-----	-----	12,8	-----	-----	5,63
Extraíbles totales	-----	-----	20,4	-----	-----	12,22
Celulosa	48,75	45,50	43,1	45,85	-----	35,36
Hemicelulosa	20,22	27,10	-----	-----	-----	31,71
Holocelulosa	68,97	72,60	-----	75,13	79,50	64,07
Lignina	16,06	11,00	23,8	27,83	24,50	15,08

(1) Sorgo, (2) Maíz (Plantas anuales) (BELAYACHI, L.; DELMAS, M.; 1997)

(3) Raquis Palma Sudan (KHRISTOVA, KORDSACHIA, KHIDER, 2005)

(4) Eucalyptus Camaldulensis. (CACERES, BAUTISTA, 1975)

(5) Guarumo (Cecropia Tessmannii). (RODRIGUEZ de CACERES, CACERES, 1978)

ANEXO B. Resultados de las digestiones. Tablas que muestran el comportamiento del rendimiento, del número kappa, del grado de deslignificación y del consumo de álcali, en pulpas con una carga de 15% de álcali, temperaturas de 150°C y 160°C, tiempo de elevación de 60 minutos y porcentajes de antraquinona del 0, 0.05 y 0.1, obtenidas a partir del raquis de la palma africana.

TABLA B-1. Temperatura 150°C, tiempo a temperatura máxima 60 y 90 min.

DIG	t total	t _{máxT}	AQ	Alcali (1)	Alcali (2)	pH final	No. kappa	Lig (3)	Des (4)	Rend (5)
	min	min	%	%	%			%	%	%
5	120	60	0	77,9	83,9	10,3	93,1	12,1	19,8	64,3
6			0,05	78,5	83,5	10,9	91,3	11,9	21,3	61,9
9			0,1	80,9	86,1	10,4	77,0	10,0	33,6	62,1
3	150	90	0	78,8	87,7	10,9	95,3	12,4	17,8	60,0
4			0,05	80,7	88,3	10,1	82,3	10,7	29,0	60,7
10			0,1	81,4	86,5	10,4	78,7	10,2	32,2	59,6

TABLA B-2. Temperatura 160°C, tiempo a temperatura máxima 60 y 90 min.

DIG	t total	t _{máxT}	AQ	Álcali (1)	Álcali (2)	pH final	No. kappa	Lig (3)	Des (4)	Rend (5)
	min	min	%	%	%			%	%	%
7	120	60	0	81,2	86,6	9,9	95,6	12,4	17,6	62,2
8			0,05	81,5	87,5	9,8	84,8	11,0	26,9	63,0
11			0,1	85,2	88,1	10,2	65,4	8,5	43,6	59,9
2	150	90	0	82,4	88,6	10,0	84,6	11,0	27,1	59,2
1			0,05	80,3	86,0	9,8	76,1	9,90	34,4	59,2
12			0,1	81,9	88,5	10,2	65,9	8,6	43,2	58,1

(1): Álcali consumido al alcanzar la temperatura máxima de digestión; (2): Álcali consumido al completarse el proceso de digestión; (3): Lignina residual después de la digestión; (4): Grado de deslignificación alcanzado durante la digestión; (5): Rendimiento de pulpa después de la digestión.

ANEXO C. Influencia de la Antraquinona sobre el grado de deslignificación. Grado de deslignificación en pulpas con una carga de 15% de álcali, temperaturas de 150°C y 160°C, tiempo de elevación de 60 minutos y porcentajes de antraquinona del 0, 0.05 y 0.1%, obtenidas a partir del raquis de la palma africana.

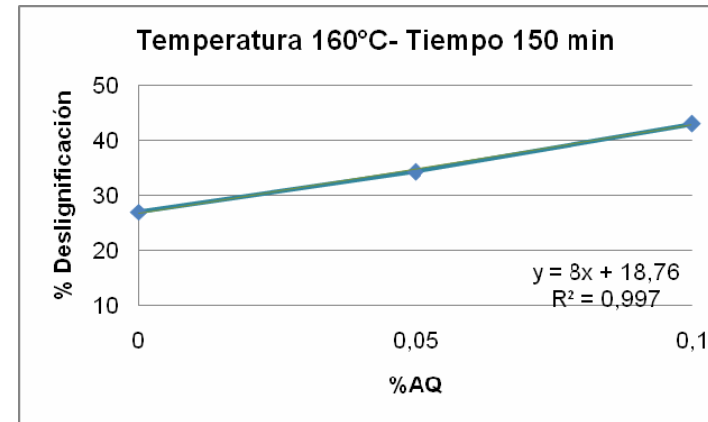
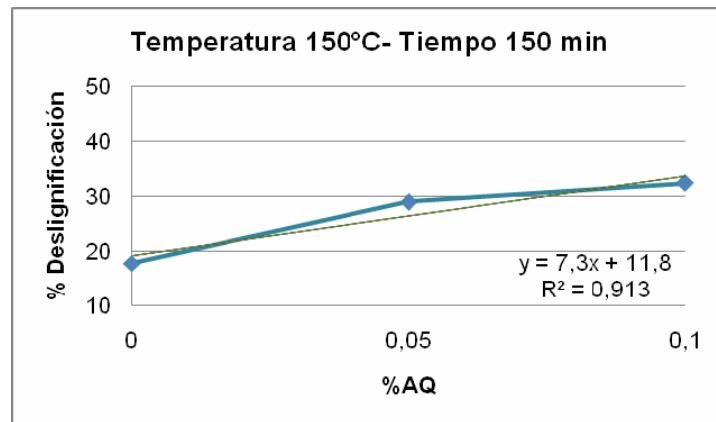
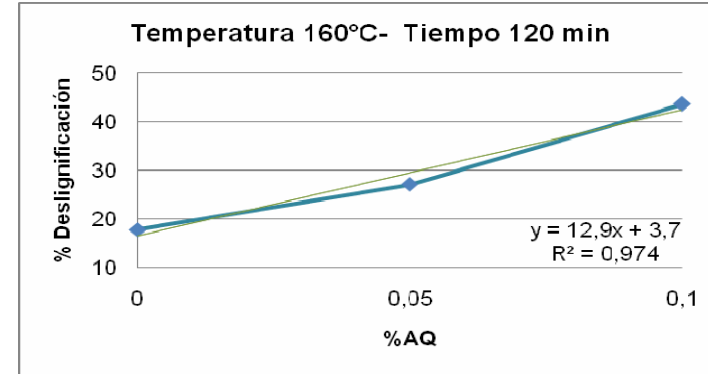
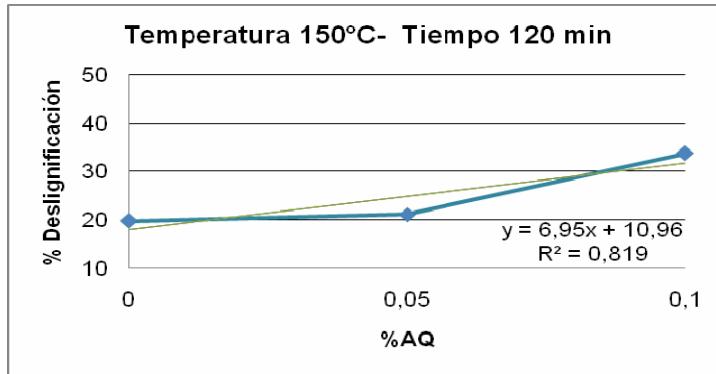


Figura C-1. Gráficas del comportamiento del grado de deslignificación frente al porcentaje de Antraquinona.

ANEXO D. Propiedades de resistencia de pulpas para papel. Tablas que muestran el comportamiento de las propiedades de resistencia fisicomecánicas de las pulpas obtenidas a partir del raquis de la palma con un peso básico de 60 g/m² para los diferentes porcentajes de antraquinona en el proceso a la soda y soda-antraquinona, con temperatura máxima de digestión de 150°C y 160°C, tiempo total de reacción de 120 y 150 min, y una carga de álcali del 15 %.

TABLA D-1. Temperatura máxima de 150° C y tiempo de digestión de 120 min

DIG	AQ	CSF	Índice de Rasgado	Indice de Explosión	Índice de Tensión	Dobleza (1)	Calibre	Densidad	Volumen específico
	%	mL	mN.m ² /g	Kpa/(g/m ²)	N.m/g		milpulg	g/cm ³	cm ³ /g
5	0	500	6,69	1,74	20,3	2	7,68	0,299	3,34
		400	7,12	2,43	30,1	5	6,95	0,329	3,04
		300	7,60	3,21	40,0	13	6,10	0,391	2,56
6	0,05	500	7,50	2,43	32,9	5	6,88	0,343	2,91
		400	7,78	3,13	40,6	11	6,20	0,368	2,71
		300	7,14	3,63	47,1	20	5,84	0,391	2,56
9	0,1	500	7,60	2,53	32,0	6	6,36	0,359	2,77
		400	7,79	3,02	39,2	10	5,97	0,381	2,59
		300	7,19	3,35	45,1	17	5,82	0,398	2,48

(1) Dobleza, expresada como número de dobleces.

TABLA D-2. Temperatura máxima de 150° C y tiempo de digestión de 150 min.

DIG	AQ	CSF mL	Índice de Rasgado	índice de Explosión	Índice de Tensión	Dobleces (1)	Calibre	Densidad	Volumen especifico
	%		mN.m ² /g	Kpa/(g/m ²)	N.m/g		milpulg	g/cm ³	cm ³ /g
3	0	500	8,13	2,93	34,7	8	6,63	0,351	2,85
		400	7,91	3,77	40,6	13	6,30	0,360	2,77
		300	7,60	4,70	53,9	54	5,48	0,427	2,34
4	0,05	500	8,62	2,94	40,0	12	6,44	0,355	2,82
		400	8,45	3,90	43,9	39	5,76	0,398	2,51
		300	8,21	5,02	54,9	115	4,90	0,465	2,15
10	0,1	500	7,88	3,03	39,2	9	6,09	0,374	2,69
		400	8,08	3,89	49,0	20	5,35	0,419	2,39
		300	7,64	4,50	56,0	51	5,19	0,444	2,25

(1) Dobleces, expresada como número de dobleces.

TABLA D-3. Temperatura máxima de 160° C y tiempo de digestión de 120 min.

DIG	AQ	CSF	Índice de Rasgado	índice de Explosión	Índice de Tensión	Doblez (1)	Calibre	Densidad	Volumen específico
	%	mL	mN.m ² /g	Kpa/(g/m ²)	N.m/g		milpulg	g/cm ³	cm ³ /g
7	0	500	7,36	2,60	32,5	6	6,33	0,367	2,74
		400	7,23	3,23	40,5	16	5,56	0,412	2,42
		300	6,72	3,43	44,7	25	5,35	0,428	2,34
8	0,05	500	7,04	2,24	29,4	4	6,83	0,342	2,93
		400	7,61	2,78	35,5	10	6,53	0,360	2,78
		300	6,95	3,38	44,7	16	5,76	0,591	2,37
11	0,1	500	7,83	3,12	34,8	12	5,62	0,402	2,48
		400	7,66	3,74	44,1	27	5,28	0,430	2,32
		300	7,46	4,62	54,8	46	4,93	0,436	2,16

(1) Dobleza, expresada como número de dobleces.

TABLA D-4. Temperatura máxima de 160° C y tiempo de digestión de 150 min.

DIG	AQ	CSF	Índice de	índice de	Índice de	Doblez (1)	Calibre	Densidad	Volumen
	%		Rasgado	Explosión	Tensión		milpulg	g/cm ³	especifico
		mL	mN.m ² /g	Kpa/(g/m ²)	N.m/g				cm ³ /g
2	0	500	7,76	3,44	44,6	15	5,68	0,403	2,48
		400	7,68	3,67	51,0	27	5,35	0,431	2,32
		300	7,57	3,94	54,9	42	5,20	0,450	2,22
1	0,05	500	7,33	2,50	35,0	5	6,69	0,344	2,91
		400	7,37	3,17	39,8	9	6,42	0,361	2,77
		300	7,20	3,70	43,5	15	6,09	0,370	2,70
12	0,1	500	8,07	3,45	42,1	11	5,77	0,390	2,57
		400	8,38	4,68	54,3	40	5,00	0,457	2,18
		300	7,97	4,94	61,3	66	4,96	0,466	2,15

(1) Doblez, expresada como número de dobleces.

ANEXO E. Influencia del refinado sobre las propiedades de resistencia de pulpas para papel. Propiedades de resistencia fisicomecánicas de las pulpas obtenidas a partir del raquis de la palma con un peso básico de 60 g/m^2 para los diferentes porcentajes de antraquinona en el proceso a la soda y soda-antraquinona, con temperatura máxima de digestión de 150°C y 160°C , tiempo total de reacción de 120 y 150 min, y una carga de álcali del 15 %.

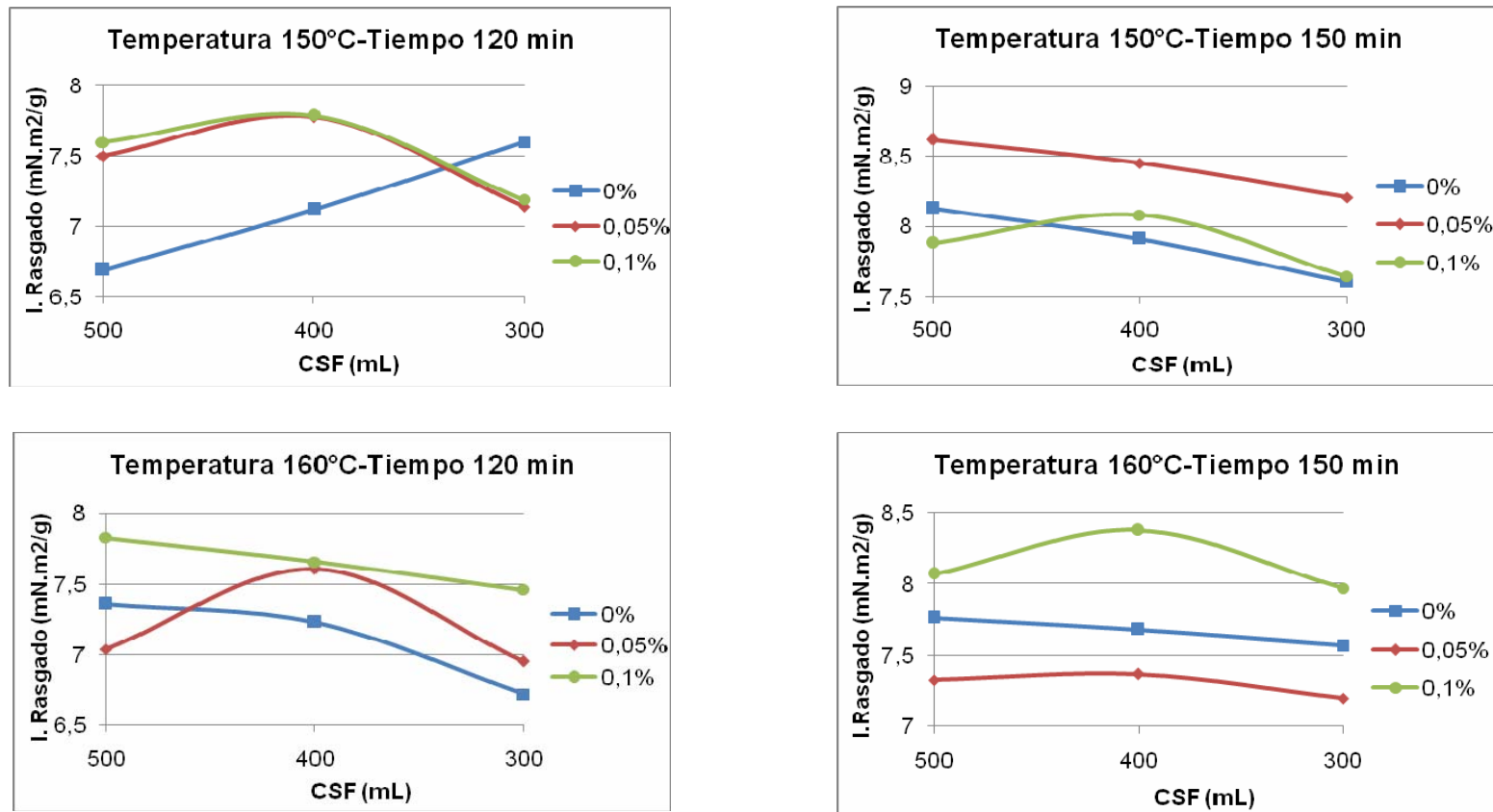


Figura E-1. Gráficas del índice de Rasgado frente al grado de refinado.

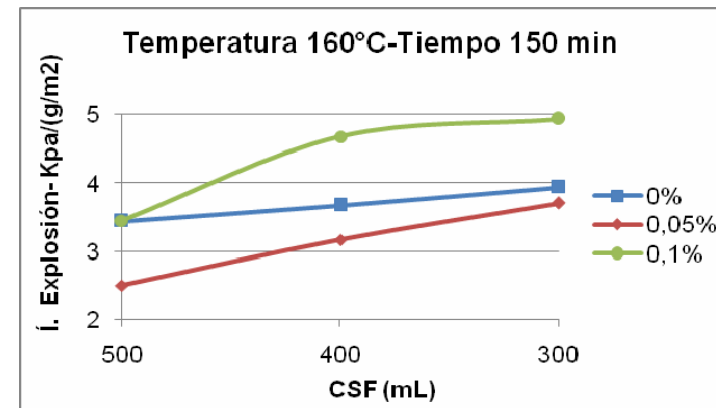
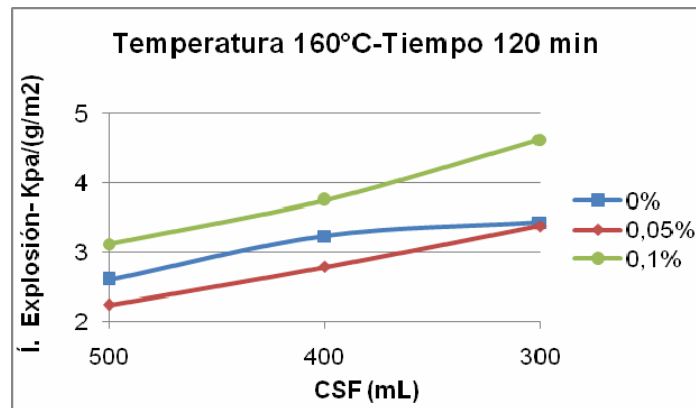
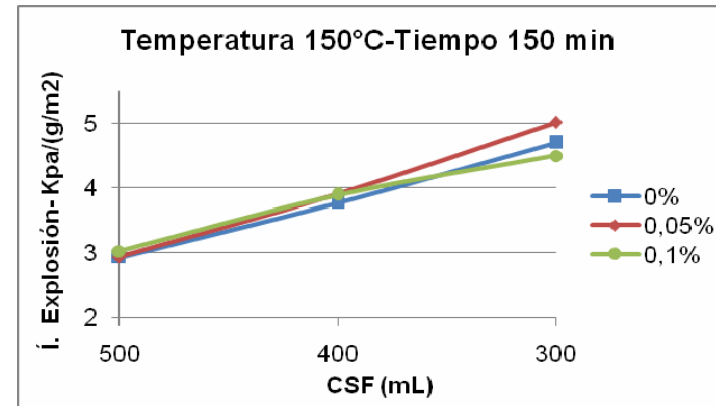
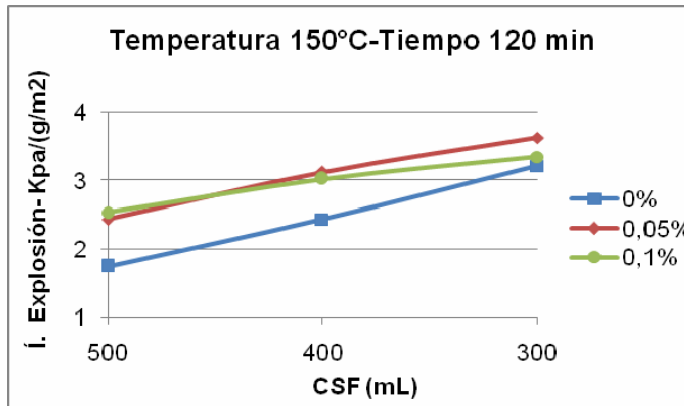


Figura E-2. Gráficas del Índice de Explosión frente al grado de refinó.

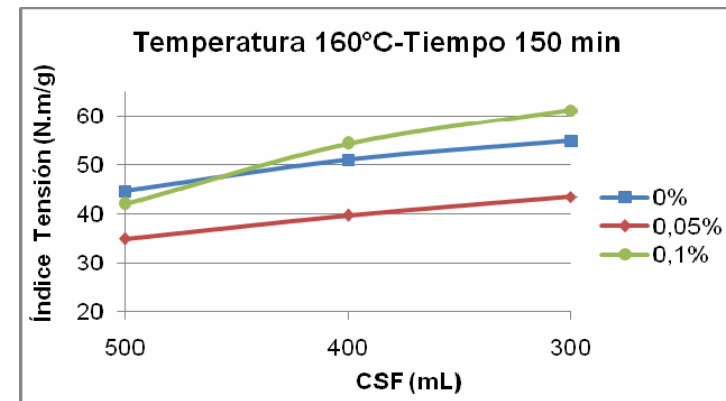
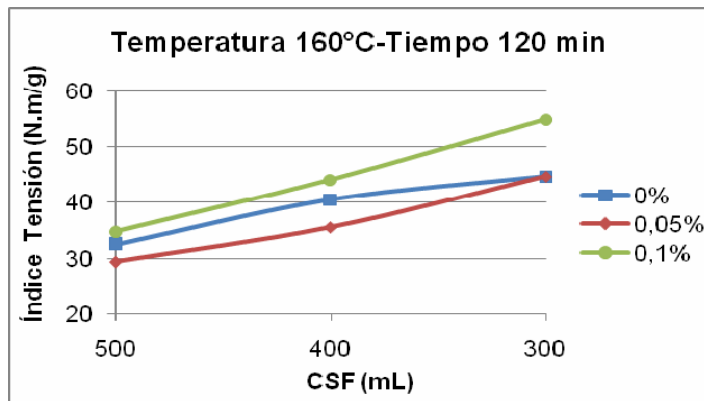
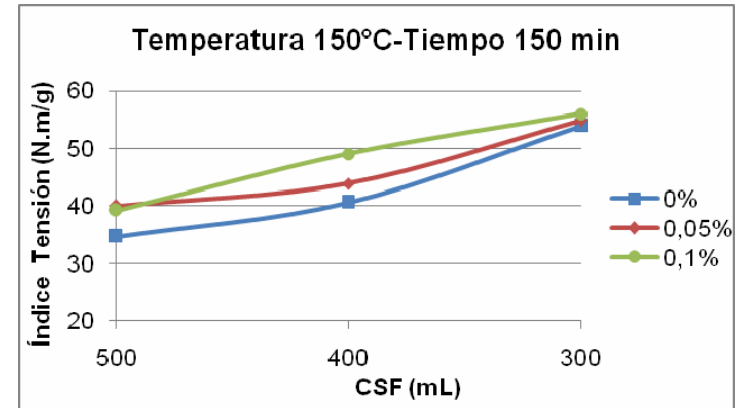
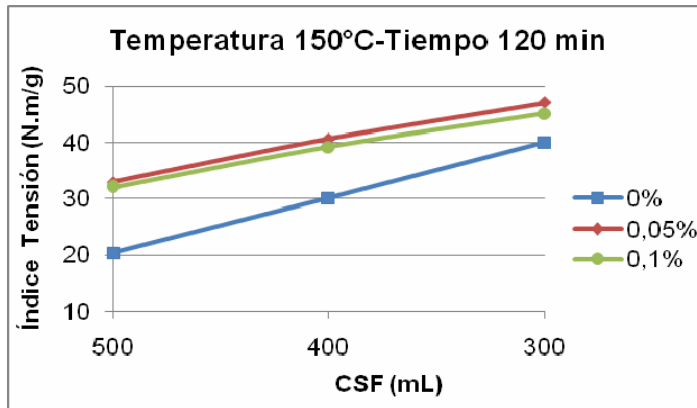


Figura E-3. Gráficas del índice de Tensión frente al grado de refinó.

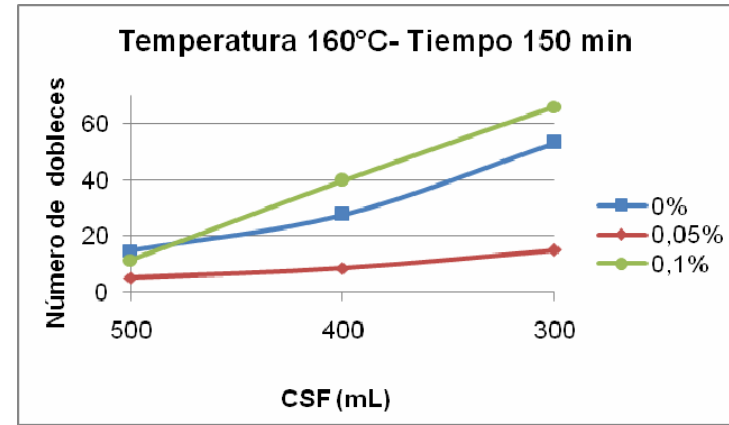
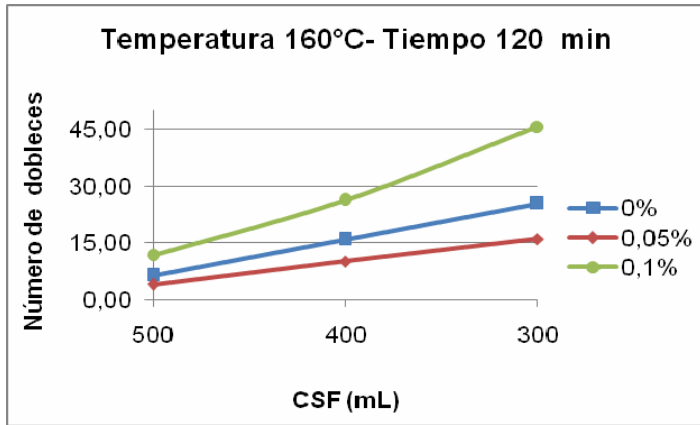
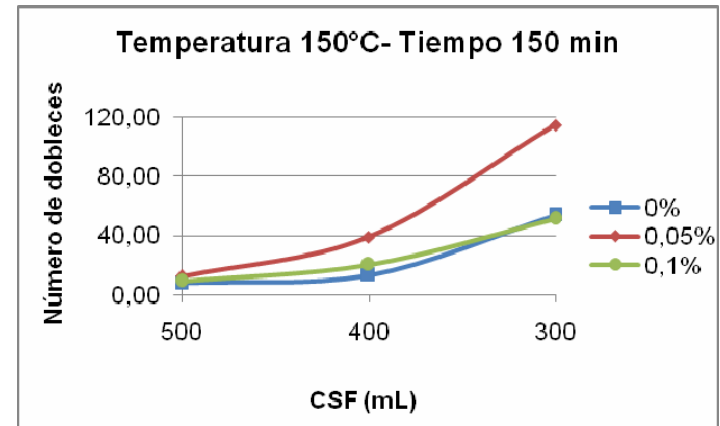
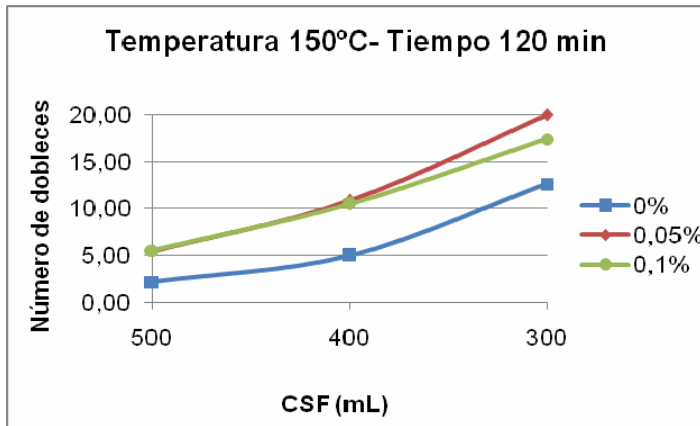


Figura E-4. . Gráficas de número de dobles frente al grado de refinó.

ANEXO F. Propiedades de resistencia de pulpas para liners y ondulado medio para cartón. Tablas que muestran el comportamiento de las propiedades de resistencia fisicomecánicas de las pulpas obtenidas a partir del raquis de la palma africana con un peso básico de 135 g/m² para los diferentes porcentajes de antraquinona en el proceso a la soda y soda-antraquinona, con temperatura máxima de digestión de 150°C y 160°C, tiempo total de reacción de 120 y 150 min, y una carga de álcali del 15 %.

TABLA F-1. Temperatura máxima de 150 °C y tiempo de digestión de 120 min.

DIG	AQ	CSF	CMT	CLT	CFC	RCT	Calibre	Densidad	Volumen específico
	%	mL	Lb-f	Lb-f	Lb-f	Lb-f	milpulg	g/cm ³	cm ³ /g
5	0	500	16,8	6,48	40,0	21,0	14,6	0,355	2,82
		400	30,8	8,70	55,0	34,6	13,7	0,380	2,63
		300	46,8	11,0	71,2	49,0	12,9	0,408	2,45
6	0,05	500	29,9	10,2	58,1	26,9	12,9	0,411	2,43
		400	41,4	10,4	73,7	32,9	11,8	0,451	2,22
		300	44,5	7,25	84,4	41,0	11,6	0,462	2,16
9	0,1	500	26,8	12,3	53,9	31,4	12,7	0,411	2,43
		400	37,5	11,6	67,6	38,7	12,0	0,440	2,29
		300	47,9	10,5	85,5	39,8	11,7	0,458	2,18

TABLA F-2. Temperatura máxima de 150 °C y tiempo de digestión de 150 min.

DIG	AQ	CSF	CMT	CLT	CFC	RCT	Calibre	Densidad	Volumen especifico
	%	mL	Lb-f	Lb-f	Lb-f	Lb-f	milpulg	g/cm³	cm³/g
3	0	500	16,0	3,90	41,0	29,4	14,7	0,354	2,82
		400	18,7	2,75	85,4	36,4	10,7	0,494	2,02
		300	31,0	0,512	99,7	41,1	9,82	0,546	1,83
4	0,05	500	26,3	2,48	64,5	36,1	12,7	0,421	2,37
		400	32,0	1,20	81,5	36,8	10,9	0,488	2,05
		300	36,4	0	96,7	35,4	9,10	0,588	1,70
10	0,1	500	27,5	10,2	65,4	31,0	12,6	0,413	2,42
		400	43,6	12,5	73,0	37,6	11,5	0,442	2,26
		300	58,6	13,7	89,0	46,6	10,5	0,497	2,02

TABLA F-3. Temperatura máxima de 160 °C y tiempo de digestión de 120 min.

DIG	AQ	CSF	CMT	CLT	CFC	RCT	Calibre	Densidad	Volumen especifico
	%	mL	Lb-f	Lb-f	Lb-f	Lb-f	milpulg	g/cm³	cm³/g
7	0	500	21,0	8,77	51,7	28,7	13,8	0,370	2,70
		400	31,8	7,37	66,2	35,0	12,5	0,412	2,46
		300	50,7	4,63	87,8	39,4	10,3	0,497	1,98
8	0,05	500	22,9	10,8	54,1	27,3	13,1	0,406	2,47
		400	31,6	10,5	71,4	33,0	12,4	0,430	2,33
		300	56,7	9,80	87,3	37,4	11,1	0,477	2,09
11	0,1	500	30,0	6,45	58,6	36,0	12,2	0,434	2,31
		400	43,2	8,00	75,2	41,2	11,5	0,465	2,15
		300	57,6	11,2	95,5	48,0	10,3	0,519	1,93

TABLA F-4. Temperatura máxima de 160 °C y tiempo de digestión de 150 min.

DIG	AQ	CSF	CMT	CLT	CFC	RCT	Calibre	Densidad	Volumen especifico
	%	mL	Lb-f	Lb-f	Lb-f	Lb-f	milpulg	g/cm³	cm³/g
2	0	500	28,3	1,352	72,9	34,1	10,4	0,505	1,98
		400	30,5	0,900	85,5	39,5	9,70	0,538	1,86
		300	31,0	0,100	96,7	46,5	9,40	0,552	1,81
1	0,05	500	31,6	4,43	57,5	30,9	12,9	0,410	2,44
		400	39,2	3,97	68,0	32,7	12,3	0,424	2,36
		300	42,0	3,20	74,9	39,6	12,2	0,424	2,36
12	0,1	500	35,1	13,3	65,1	38,7	11,9	0,443	2,26
		400	52,9	13,1	85,9	44,7	11,0	0,480	2,08
		300	61,0	12,1	99,5	53,4	10,3	0,509	1,96

ANEXO G. Influencia del refinado sobre las propiedades de resistencia de pulpas para cartón. Propiedades de resistencia fisicomecánicas de las pulpas obtenidas a partir del raquis de la palma con un peso básico de 135 g/m² para los diferentes porcentajes de antraquinona en el proceso a la soda y soda-antraquinona, con temperatura máxima de digestión de 150°C y 160°C, tiempo total de reacción de 120 y 150 min, y una carga de álcali del 15 %.

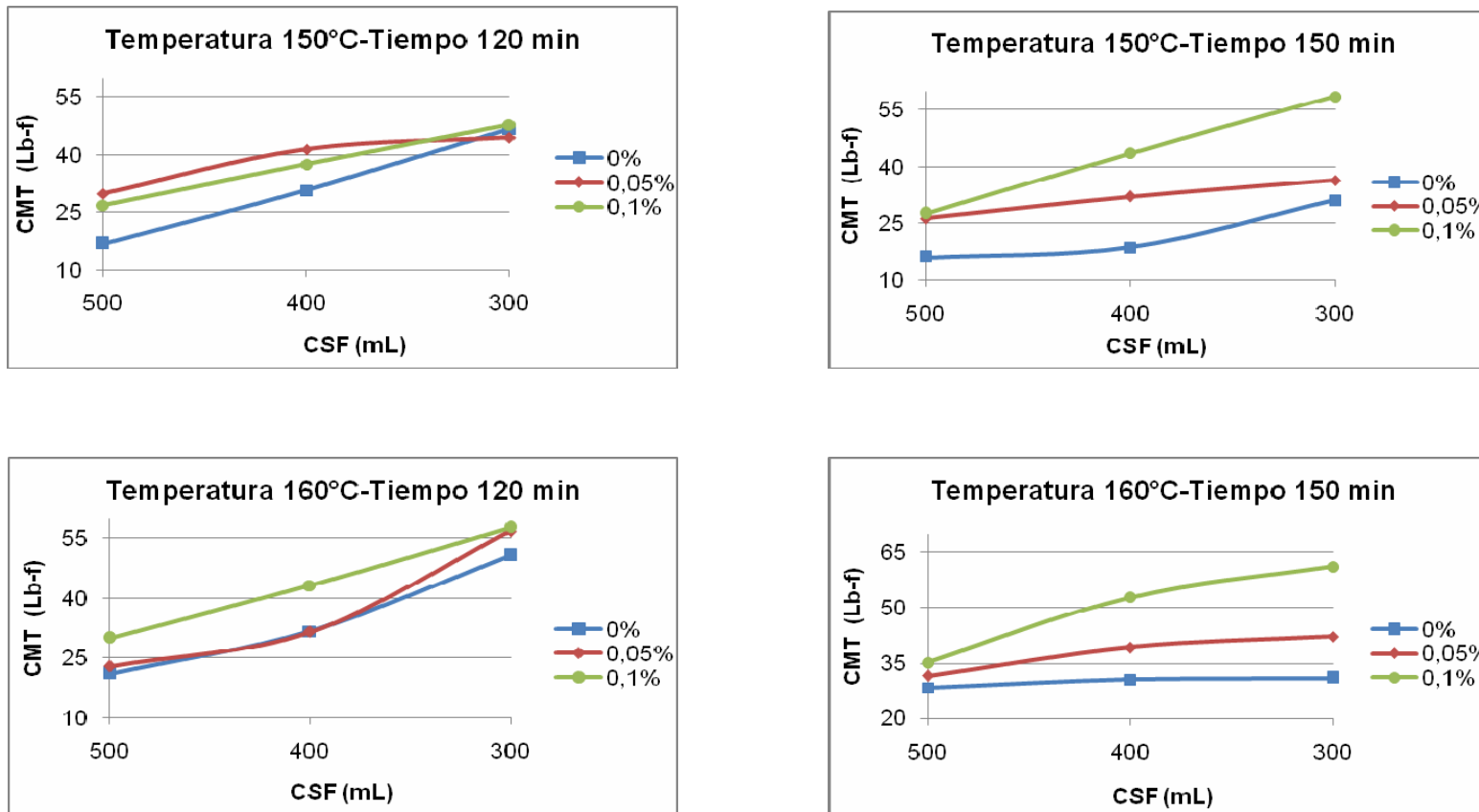


Figura G-1. Gráficas de CMT frente al grado de refinado.

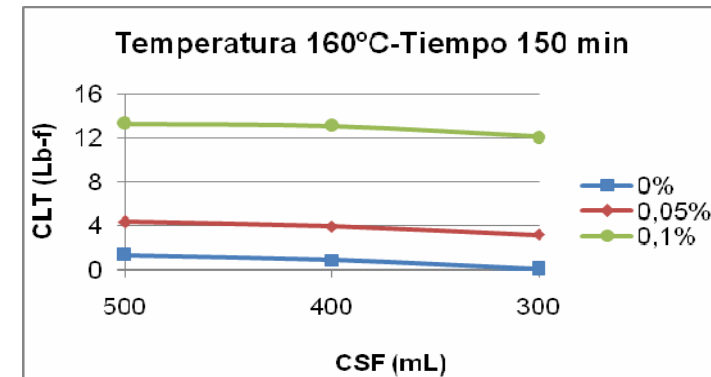
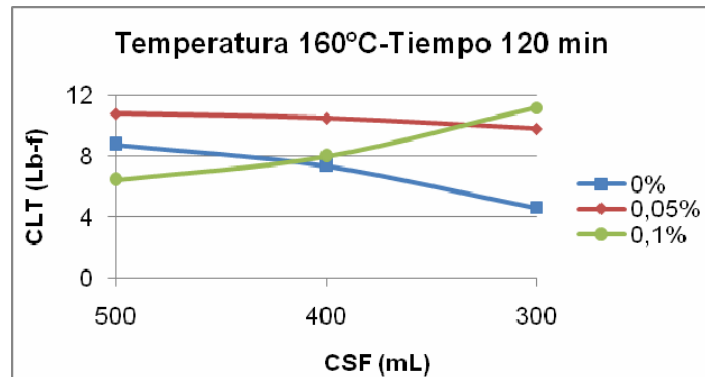
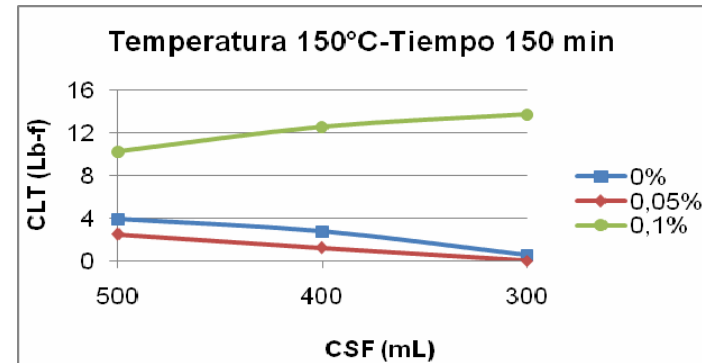
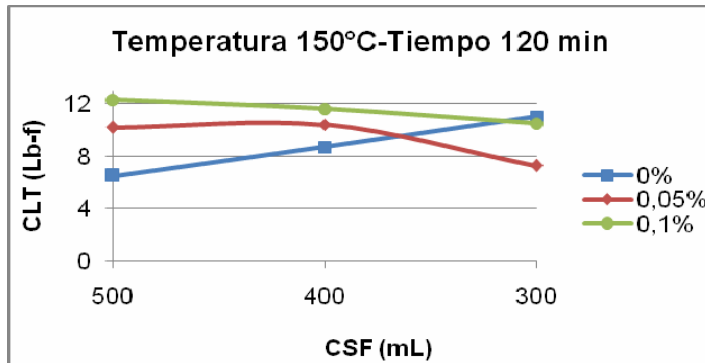


Figura G-2. Gráficas de CLT frente al grado de refino.

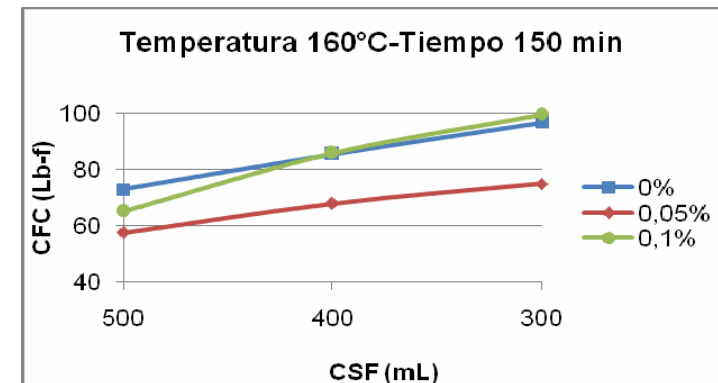
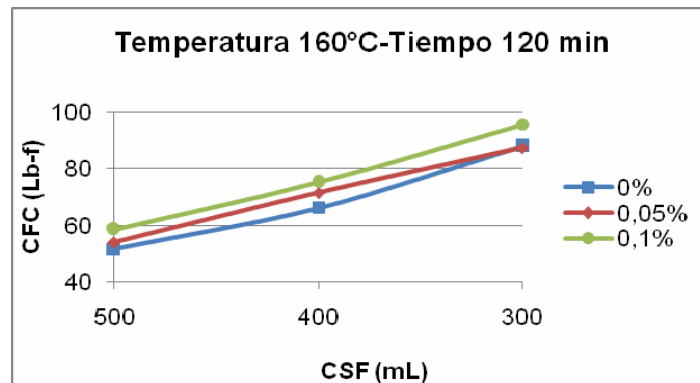
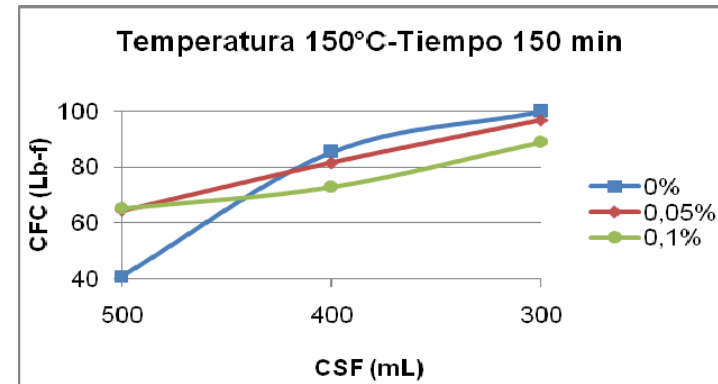
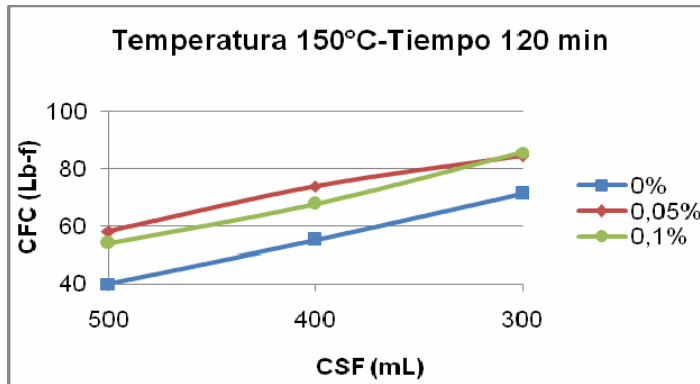


Figura G-3. Gráficas de CFC frente al grado de refin.

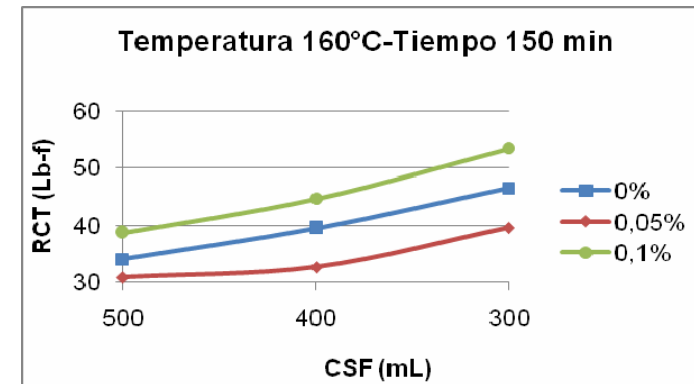
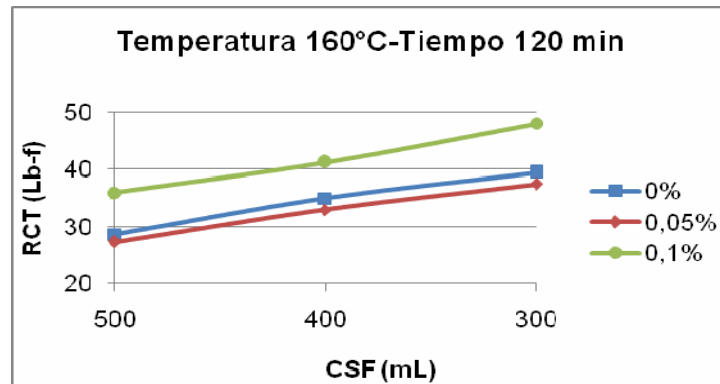
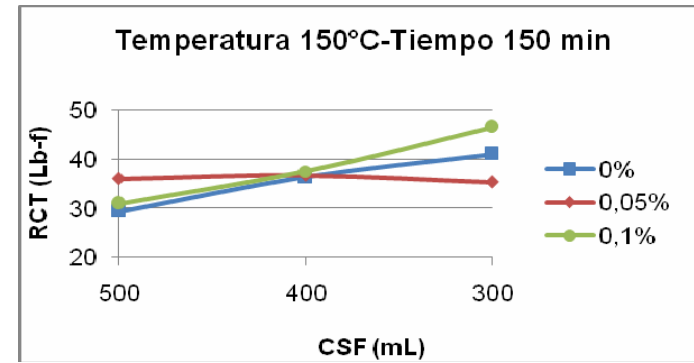
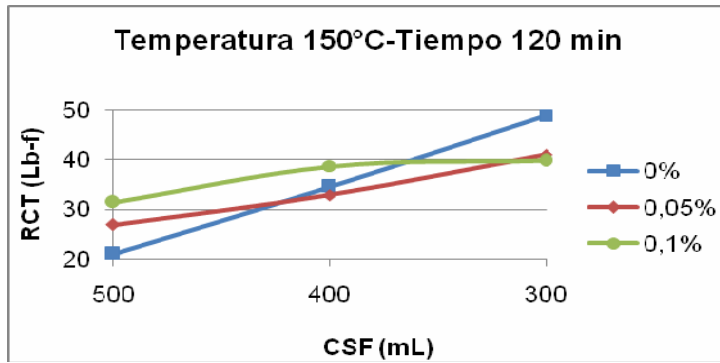


Figura G-4. Gráficas de RCT frente al grado de refino.

ANEXO H. Comparación de propiedades de resistencia de pulpas para papel entre diferentes materiales fibrosos.

Tabla H-1. Propiedades fisicomecánicas de diferentes materiales expuestos al proceso de soda-AQ

Material	CSF	Indice de Rasgado	Indice de Explosión	Indice de Tensión	Doblez
		mN.m2/g	Kpa/(g/m2)	N.m/g	
Palma africana	500	8,07	3,45	42,1	11
	400	8,38	4,68	54,3	40
	300	7,97	4,94	61,3	66
Tallo girasol	300	3,67	3,39	43,1	17
Bagazo	-----	6,4	2,9	48,3	-----
	500	6,1	4,8	74,4	-----
	425	6,0	4,8	77,8	-----

Palma africana; 15% como NaOH; 0.1% AQ; Temperatura máxima 160°C; Tiempo elevación 60 min; tiempo a máxima temperatura 90 min.

Tallo girasol; 16% como Na₂O; 0,13% AQ; Temperatura máxima 170°C; Tiempo elevación 120 min; tiempo a máxima temperatura 90 min. (KHRISTOVA et al; 1998).

Bagazo; 10,9% como Na₂O; 0.1% AQ; Temperatura máxima 155°C; Tiempo elevación 60 min; tiempo a máxima temperatura 120 min. (KHRISTOVA et al; 2006)

ANEXO I. Resultados del tratamiento de blanqueo.

Tabla I-1. Parámetros de seguimiento de las etapas de blanqueo.

Pulpa	Etapa	Agente titulado	Cantidad inicial	Cantidad final	Consumo final	Cantidad residual	pH inicial	pH final	
			(g)	(g)	%	%			
Ensayo 1	1	H	Cl ₂	15,6	2,79	82,1	17,9	11,3	10,5
	2	H	Cl ₂	8,4	0,0193	99,8	0,2	11,0	8,8
Ensayo 2	1	H	Cl ₂	16,3	0,058	99,6	0,4	11,3	9,4
	2	H	Cl ₂	6,98	3,73	46,6	53,4	11,4	11,4
Ensayo 3	1	H	Cl ₂	16,8	0,0942	99,4	0,6	11,8	9,8
	2	H	Cl ₂	5,60	2,07	63	37	11,4	10,2
Final	1	H	Cl ₂	105	4,5	95,7	4,3	11,6	9,8
	2	H	Cl ₂	34,9	16,9	51,6	48,4	11,2	11
		P	H ₂ O ₂	8,39	3,11	62,9	37,1	10,6	10,3

Tabla I-2. Resultados del proceso de blanqueo de la pulpa morena.

Pulpa	No. Kappa	Lignina residual %	Blancura	Grado de deslignificación (1)	Rendimiento %
Morena	70,7	10,6	20,8	29,7	60,9
Ensayo 1	6,44	0,97	79,0	93,6	-----
Ensayo 2	7,19	1,08	75,3	92,8	-----
Ensayo 3	8,82	1,32	72,8	91,2	-----
Final Hipoclorito	4,61	0,69	75,7	95,4	42,1
Final Peróxido	3,62	0,54	83,2	96,4	31,1

(1) La cantidad de lignina en la fibra de raquis de palma africana sin procesar corresponde a 15.08%, a partir de este porcentaje se determina el grado de deslignificación.

Tabla I-3. Influencia del proceso de blanqueo sobre las propiedades fisicomecánicas.

Pulpa	Índice de Rasgado mN.m2/g	Índice de Explosión Kpa/(g/m2)	Índice de Tensión N.m/g	Número de dobleces	Blancura
Morena	7,66	3,74	44,1	27	20,8
Blanqueada	6,53	2,30	26,0	3	83,2
Pérdida %	14,8	38,5	41,0	89	-----

Tabla I-4. Pérdida de blancura por envejecimiento.

Tiempo (h)	Blancura	Pérdida
0	83,2	0
24	78,6	5,53
48	78,1	6,13
72	77	7,45

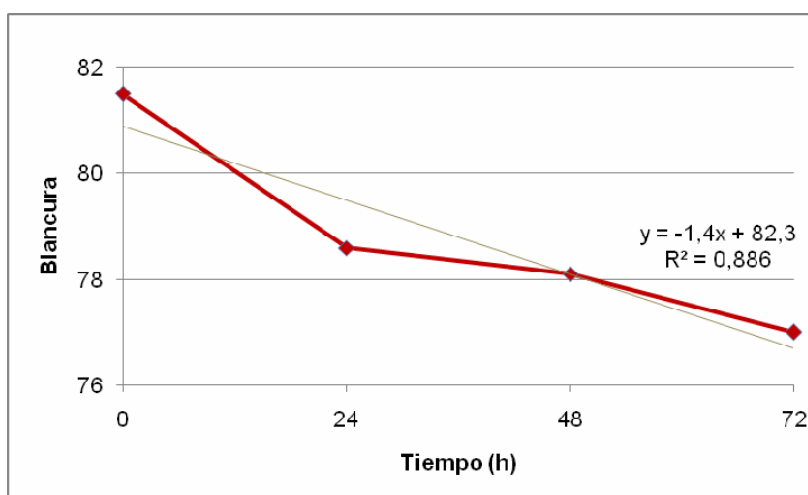


Figura I-5. Pérdida de blancura frente al tiempo de envejecimiento.

ANEXO J. Normas adicionales aplicadas en los procesos de preparación y evaluación de pulpas.

Tabla J-1. Normas complementarias

Procedimiento	Norma
Formación de hojas para pruebas físicas de la pulpa	T205m-60
Freeness de pulpa (método estándar canadiense)	T227m-58
Número de kappa en pulpa	T236m-60
Acondicionamiento estándar de atmósferas de prueba para papel , cartón, hojas de pulpa	UNE57-001
Determinación de las características físicas de hojas de ensayo de laboratorio	UNE55-79
Blancura de la pulpa	T217m-48
Prueba de estabilidad relativa del papel al calentamiento	T453m-48

ANEXO K. Glosario

BLANCURA. Es un atributo complejo de la sensación visual, por el cual un cuerpo se parece aproximadamente al blanco, debido a una elevada claridad, una gran difusión y a la ausencia de tonalidad perceptible. La blancura se determina mediante un espectrofotómetro Zeiss Elrepho.

BLANQUEO. Eliminación o modificación, más o menos pronunciada, del color de los componentes de una pulpa con objeto de mejorar su blancura.

CALIBRE. Espesor de una hoja de pulpa o papel. La lectura se expresa en milésimas de pulgada.

CENIZA. Residuo mineral que queda después de calcinar una muestra de pulpa, papel o cartón.

COCCIÓN. Tratamiento con calor de una materia prima fibrosa, en presencia de agua a la que se han añadido ciertos productos químicos.

COMPRESIÓN DEL ONDULADO O CONCORO (CMT). Esta aplicación se practica en el material intermedio (acanaladura) del cartón ondulado, y se expresa en las siguientes unidades: lb, Kg o N.

COMPRESIÓN EN PLANO DEL CARTÓN ONDULADO (FCT). Esta determinación se practica en el cartón ondulado y se expresa en Kg/cm², lb/plg² y N/cm².

COMPRESIÓN LATERAL (CLT). Esta determinación se aplica en el liner o cara del cartón ondulado y sus unidades son en Newton.

CONSISTENCIA. La consistencia de una pulpa o, más propiamente, la “concentración”, está definida como el peso en gramos de fibra base seca en 100 gramos de suspensión.

CROMÓFORO. Grupo de átomos en una molécula responsables del color del compuesto.

DEGRADACIÓN. Reacción química que involucra la descomposición de una sustancia en moléculas más simples.

EXTRACCIÓN ALCALINA. Fase de blanqueo (E) realizada a elevado pH en la cual se solubilizan y eliminan las ligninas cloradas.

FIBRA. Elemento morfológico fundamental de las plantas superiores. Las fibras son un cúmulo de células de forma aproximadamente cilíndricas, de longitud y diámetro variable. Tienen extremos cerrados y alguna vez en punta. Sus paredes, cuyo principal componente es la celulosa, pueden ser más o menos espesas y estar atravesadas por aberturas de pequeñas dimensiones llamadas aureolas. Las fibras tienen la pared celular conformada por dos capas diferentes llamadas pared primaria y pared secundaria. Como en la preparación de las materias fibrosas las fibras del material empleado mantienen casi intacta su estructura, las fibras representan en realidad los elementos morfológicos que constituyen la masa de las materias fibrosas y determinan sus propiedades y empleo.

FIBRILACIÓN. Liberación de fibrillas producida por la ruptura parcial de las paredes de las fibras sometidas a un tratamiento apropiado, por ejemplo, refinación.

FIBRILLAS. Elementos estructurales largos y delgados de las paredes de las fibras que, a su vez, constan de elementos aún más finos y filamentosos denominados microfibrillas.

GRADO DE POLIMERIZACIÓN. Aplicado a la celulosa, se refiere al número promedio de unidades de anhidroglucosa existentes en cada molécula de celulosa en una muestra de pulpa.

GRAMAJE. Masa de pulpa, papel o cartón, expresada en gramos por metro cuadrado, medida según condiciones normalizadas.

HEMICELULOSA. Término general con que se conoce a los polisacáridos distintos de la celulosa que son constituyentes de las paredes celulares de los vegetales.

HINCHAMIENTO DE LA CELULOSA. Modificación física que experimenta la celulosa cuando se pone en contacto con el agua líquida o en forma de vapor. La celulosa adsorbe moléculas de agua, que se entremezclan entre sus macromoléculas, aumentando las distancias entre ellas. Muchos compuestos químicos, en especial los alcalinos, favorecen el hinchamiento de las fibras.

HOLOCELULOSA. Producto que esencialmente comprende el contenido total de polisacáridos de la madera (celulosa y hemicelulosa). La holocelulosa se prepara mediante la eliminación selectiva de sustancias extraíbles y lignina de la madera.

LICOR DE COCCIÓN. Solución de reactivos que se emplea en la cocción de materiales lignocelulósicos destinados a la producción de pulpa.

LIGNINA. Polímero aromático que forma parte del tejido de sostén de los vegetales; suele estar asociada a la celulosa. Se deposita especialmente en las paredes celulares del esclerénquima, en los vasos xilemáticos y en las traqueidas. Está formada especialmente por unidades de fenilpropano unidas irregularmente.

NÚMERO KAPPA. Es el número de centímetros cúbicos de una solución de 0.1 N de permanganato de potasio consumidos por un gramo de pulpa libre de humedad, y se usa para dos propósitos específicos:

- Indicar el grado de deslignificación que ocurre durante la cocción, esto es, una prueba para controlar la cocción.
- Indicar los requerimientos de reactivos en el blanqueo.

PAPEL. Lámina constituida esencialmente por fibras celulósicas de origen natural y otras sustancias orgánicas e inorgánicas que se entrelazan y forman una hoja afieltrada. Por encima de cierto gramaje o una cierta rigidez, el papel se denomina cartulina o cartón.

PARÉNQUIMA. Tejido vegetal constituido por células adultas de forma cúbica, prismática o esferoidal, con las membranas delgadas y no lignificadas.

PILA HOLANDESA. Aparato provisto de una platina y de un cilindro destinado al tratamiento de materias fibrosas en medio acuoso, con objeto de conferirles determinadas características.

PULPA. Materia prima celulósica, de estructura fibrosa y origen natural vegetal, preparada para la fabricación de papel y cartón.

PULPA MAGRA. Pulpa morena obtenida en el proceso de digestión que posee un contenido alto de lignina y no ha sido expuesta a un tratamiento de blanqueo.

REFINACIÓN. Trabajo mecánico dado a la fibra y cuyo objetivo es primeramente separar las fibras, para de esta manera fibrillarlas, cortarlas e hidratarlas, proporcionándoles cierta particularidad, en función de la cual dará al papel ciertas propiedades.

ANEXO L. EQUIPOS EMPLEADOS

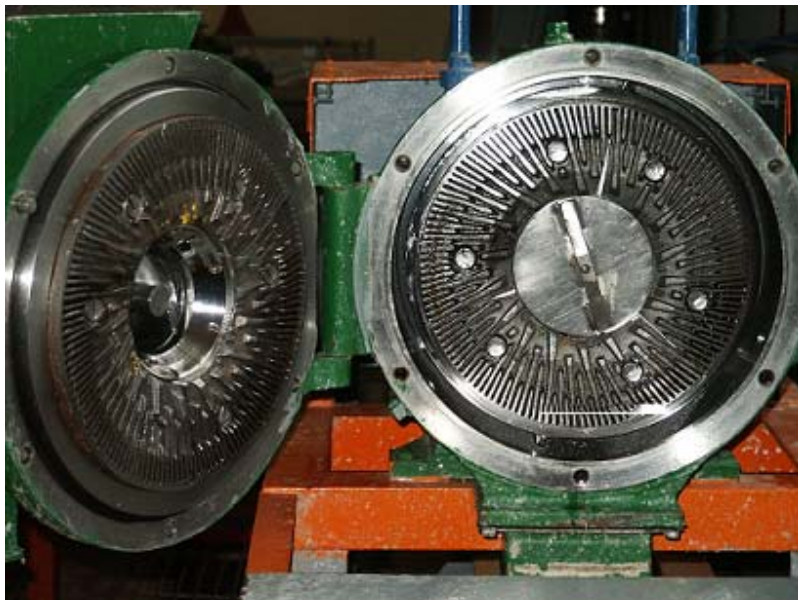


Figura L-1. Sproud Waldron.



Figura L-2. Holandesa Valley



Figura L-3. Micrómetro.



Figura L-4. Medidor de la resistencia a la explosión Mullen Tester.



Figura L-5. Probador Elmendor Tearing Tester



Figura L-6. Tensímetro TMI.



Figura L-7. El Repho.

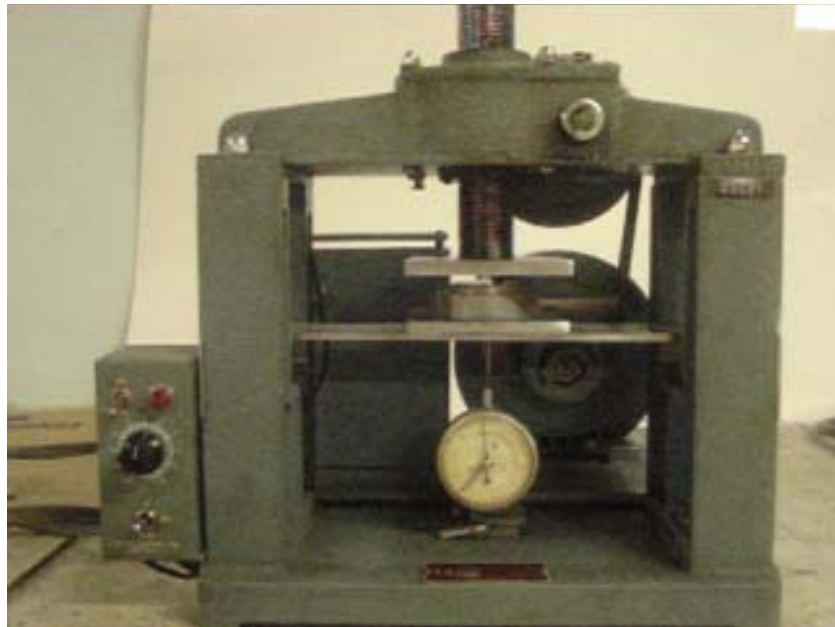


Figura L -8. Concora Medium Tester.

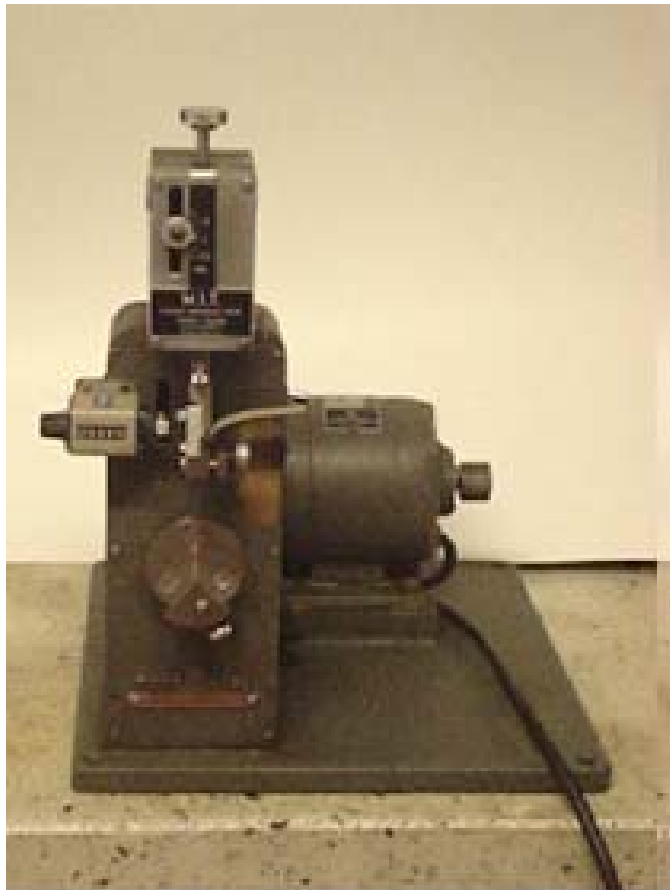


Figura L-9. Probador Folding Endurance Tester.

ANEXO M. Estabilidad de la blancura de la pulpa por exposición a un envejecimiento acelerado a 105°C.



Figura M-1. Prueba de envejecimiento.

*Tesis

** . Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director, Luz Amparo Lozano Urbina; Codirector, Guillermo González Sierra.