



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

Producción de hojas de papel a
partir de pulpa de bagazo de
agave espadín (*Angustifolia
Haw.*)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

ARTURO IVÁN VELÁZQUEZ CHAGOYA

ASESOR DE TESIS:

Q. CELESTINO SILVA ESCALONA

Cautitlán Izcalli, Estado de México 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Producción de hojas de papel a partir de pulpa de bagazo de agave espadín (Angustifolia Haw.)

Que presenta el pasante: Arturo Iván Velázquez Chagoya
Con número de cuenta: 309280932 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 25 de Abril de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Q. Celestino Silva Escalona	
VOCAL	I.Q. Elvia Mayen Santos	
SECRETARIO	I.Q. Miguel Ángel Vázquez Flores	
1er. SUPLENTE	I.A. Dulce María Oliver Hernández	
2do. SUPLENTE	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	

NOTA: los sindicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

Dedicatoria.

Dedico esta tesis en primer lugar al todopoderoso por haberme dado la fuerza, la capacidad y habilidad para poder concluir mis estudios, por rodearme de las personas indicadas en el momento adecuado. Por brindarme la hermosa familia a la cual pertenezco y porque sin él, no hubiese ocurrido nada de esto.

A mis padres, que han sido la base de éste primer logro en mi vida y quienes me han dado todo para ser quien soy hasta el día de hoy:

Mi padre Antonio Velázquez Rueda por siempre ser un ejemplo de coraje, fuerza, determinación y compromiso para lograr alcanzar mis objetivos y metas. Un hombre que siempre ha dado lo mejor de sí luchando incansablemente para darme las herramientas que me ayudarán a hacer frente a cada reto que se me presente.

Mi madre Ma del Rocío Chagoya Varona quien, con amor, paciencia y disciplina me ha guiado para ser un hombre de bien. Una mujer que se ha encargado de enseñar a mí y a mis hermanos los valores que he de poner en práctica a cada día.

A mis hermanos los cuales me han apoyado y aconsejado en cada paso de esta etapa:

Mi hermano Oscar Daniel Velázquez Chagoya que me ha compartido y aconsejado sus vivencias y experiencias, las que me han ayudado en la toma de decisiones a las que me he encarado.

Mi hermana Rocío Nayeli Velázquez Chagoya por motivarme con su ejemplo para terminar con mis estudios y por darme una mano cuando más atareado estuve.

En general a mi familia, abuelos, tíos, primos que en algún momento me ayudaron y aportaron parte de ellos mismos para que pudiera llevar a cabo esta tesis.

¡MI TOTAL ADMIRACIÓN, RESPETO Y AGRADECIMIENTO PARA CADA UNO DE ELLOS!

CON CARÍÑO:

ARTURO.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a Nancy López Gaspar quien siempre me tendió una mano cuando sentía que no podría lograrlo y que me levantó cada vez que yo caí. Porque ha caminado junto a mi durante todo este tiempo, ayudándome a crecer y mejorar como persona. Gracias a su amor, su comprensión y su apoyo he logrado terminar mis estudios profesionales y esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por permitirme formar parte de su matrícula, por los años de conocimiento adquirido en sus instalaciones y por permitirme ser orgullosamente puma.

A mis maestros y maestras que me han transmitido sus conocimientos y sus experiencias.

Hago especial mención a la profesora I. Q. Leticia Zúñiga Gómez, al profesor I. M. E. Ángel Rueda Ángeles, quienes además de ser grandes maestros, me permitieron conocerlos más allá de la docencia y por ello sé que son excelentes personas que se preocuparon por enseñarme cosas más allá del salón de clases.

A mi asesor el profesor Q. Celestino Silva Escalona que es un excelente maestro y una gran persona que me ha guiado por este proceso de titulación, compartiendo su conocimiento y experiencia en este y otros temas, quien además siempre me ha recibido con una sonrisa, energía positiva y buen humor.

A mi jurado conformado por la I. Q. Elvia Mayen Santos, el I. Q. Miguel Ángel Vázquez Flores, la Dra. Francisca Alicia Rodríguez y la I. A. Dulce Oliver Hernández por haberme retroalimentado en este trabajo y por la muy grata experiencia de haber trabajado junto con ellos para alcanzar mi objetivo de titulación.

A mis amigos y amigas

Mara Patricia Camacho Espinoza por que se ha convertido en una amiga entrañable que siempre ha estado para apoyarme y con quien he compartido momentos tanto de gran felicidad como momentos difíciles en donde he necesitado de su consejo.

Mi gran amigo Octavio Andrés y a la familia Villa Moreno quienes han estado presentes en mi vida por años y que se han convertido en parte de mi familia, gracias a que son excelentes seres humanos y en quien siempre podré apoyarme.

Agradezco también a mi tío Roberto Jesús Valle Varona quien es el primer vocal del consejo estatal del sistema producto mezcal, por la asesoría y conocimiento transmitido sobre el tema del mezcal, quien además se tomó tiempo para que yo pudiera conseguir mi materia prima y ver de primera mano el arte de elaborar mezcal.

¡Muchas gracias a todos! por hacerme crecer profesional y personalmente.

Índice

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
OBJETIVOS.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I HISTORIA DEL PAPEL.....	14
1.1. Evolución histórica del papel.....	14
CAPÍTULO II GENERALIDADES DEL AGAVE ESPADÍN (<i>ANGUSTIFOLIA HAW.</i>).....	19
2.1. <i>Agave Angustifolia Haw.</i>	19
2.1.1. Morfología.....	20
2.1.2. Distribución geográfica.....	20
2.2. Fisiología del bagazo de agave espadín.....	21
2.3. Celulosa.....	23
2.4. Hemicelulosa.....	23
2.5. Lignina.....	23
CAPÍTULO III MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA PULPA.....	24
3.1. Método Mecánico.....	24
3.2. Método Químico.....	27
3.3. Método Semiquímico.....	31
CAPÍTULO IV ELABORACIÓN DE LAS HOJAS DE PAPEL.....	35
4.1. Material, equipo, reactivos y servicios.....	35
4.2. Procedimiento experimental.....	36
4.2.1. Obtención del bagazo de agave espadín.....	37
4.2.2. Obtención de la pulpa celulósica.....	43
4.2.3. Formado de la hoja y secado de la hoja.....	49
CAPÍTULO VI PRUEBAS REALIZADAS A LAS HOJAS DE PAPEL.....	54

5.1.	Propiedades generales	55
5.1.1.	Humedad	55
5.1.2.	Espesor	56
5.1.3.	Escritura	57
5.1.4.	Borrado	58
5.1.5.	Impresión	59
5.2.	Propiedades químicas.....	60
5.2.1.	Encolado.....	60
5.2.2.	pH	61
5.2.3.	Cenizas	63
CAPÍTULO VII ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN		65
CONCLUSIONES.....		67
REFERENCIAS		69
ANEXO 1 NORMAS MEXICANAS NMX.		71
ANEXO 2 MÁRGENES PERMISIBLES DE ALGUNOS PAPELES Y CARTONES COMERCIALES. ...		73

Índice de figuras.

Figura II-1 Distribución geográfica de agave espadín (Montes, R. 2014).....	20
Figura II-2 Micrografías de tejido fresco de Agave. P: Parénquima, E: Esclerenquima, HV: Haz vascular, X: Xilema y F: Floema. A) Estereomicrografía. B) Micrografía. (Gumeta,2009 citado por Rosas, 2016)	21
Figura II-3 Micrografías del parénquima del bagazo de agave <i>Angustifolia Haw.</i> (Rosas, 2016)	21
Figura II-4 Micrografía del bagazo de agave <i>Angustifolia Haw.</i> A) Xilema. B) Floema. (Rosas,2016)22	22
Figura II-5 Diagrama esquemático de la composición macromolecular de la matriz lignocelulósica (Bessadok y col., 2009 citado por Rosas, 2016)	22
Figura III-1 Disposición de los elementos en un disco refinador (Caneda, J. 2003).....	26
Figura III-2 Proceso Kraft de obtención de pulpa y ciclo de recuperación (Caneda, J. 2003)	31
Figura III-3 Clasificación de los procesos para obtención de pulpa celulósica.....	34
Figura IV-1 Agave <i>Angustifolia Haw.</i> (capturado por el autor)	37
Figura IV-2 Llenado del horno con las piñas (autor desconocido)	38
Figura IV-3 Triturado de las piñas (autor desconocido)	39
Figura IV-4 Recipiente para fermentación (autor desconocido).....	40
Figura IV-5 Alambique de cobre (autor desconocido)	41
Figura IV-6 Campana y serpentín del alambique (autor desconocido).....	41
Figura IV-7 Mezcal envasado (autor desconocido)	42
Figura IV-8 Bagazo de agave espadín (capturada por el autor)	43
Figura IV-10 Desfibrado manual (capturada por el autor)	44
Figura IV-9 Bagazo Astillado (capturado por el autor)	44
Figura IV-11 Prueba de Humedad a la materia prima (capturada por el autor)	44
Figura IV-12 Digestión del bagazo (capturado por el autor)	45
Figura IV-13 Lavado y filtrado de la pulpa (capturada por el autor)	45
Figura IV-14 Pulpa antes y durante el molido (capturada por el autor)	46
Figura IV-15 Licuado de la pulpa (capturada por el autor)	46
Figura IV-16 Agregado de aditivos y cargas (capturada por el autor).....	47
Figura IV-17 Blanqueo de la pulpa (capturada por el autor).....	47
Figura IV-18 Pulpa lista para formar hojas (capturada por el autor)	47
Figura IV-19 Lavado de la pulpa blanqueada	47
Figura IV-20 Molde para formación de hojas (capturada por el autor)	49
Figura IV-21 Pulpa celulósica en solución (capturada por el autor).....	49
Figura IV-22 Formado de la hoja (capturada por el autor)	50
Figura IV-23 Hojas bien formadas y listas para ser prensadas (capturada por el autor)	50
Figura IV-24 Prensado de la hoja (capturada por el autor).....	51
Figura IV-25 Secado al sol. (capturada por el autor).....	51
Figura IV-26 Hojas engargoladas para su presentación final. (capturada por el autor)	52
Figura V-1 Prueba de humedad (capturada por el autor).....	55
Figura V-2 Prueba de espesor (capturada por el autor).....	56
Figura V-3 Prueba de escritura (capturada por el autor)	57
Figura V-4 Prueba de borrado (capturada por el autor)	58

Figura V-5 Prueba uno de impresión (capturada por el autor).....	59
Figura V-6 Prueba dos de impresión (capturada por el autor).	59
Figura V-7 Prueba de encolado. Método de la gota (capturada por el autor).....	60
Figura V-8 Prueba de encolado. Método del vaso (capturada por el autor)	61
Figura V-9 Prueba de pH (capturada por el autor).....	63
Figura V-10 Prueba de cenizas. Calentamiento de la mufla (capturada por el autor).....	64
Figura V-11 Prueba de cenizas. Cenizas obtenidas (capturada por el autor)	64

Índice de tablas.

Tabla 2.1 Clasificación taxonómica de la especie <i>Angustifolia Haw</i> (Gentry 1982).....	19
Tabla 4.1 Material, equipo, reactivos y servicios.....	35
Tabla 4.2 Definición de las etapas de la fabricación de papel.....	36
Tabla 5.1 Características no medibles de las hojas de papel.....	54
Tabla 5.2 Prueba de humedad.....	55
Tabla 5.3 Prueba de espesor.....	57
Tabla 5.4 Prueba de encolado.....	61
Tabla 5.5 Prueba de pH.....	62
Tabla 5.6 Prueba de cenizas.....	64

OBJETIVOS

General

- Desarrollar una técnica para producir hojas de papel a partir del bagazo del agave *Angustifolia Haw.* Que surge como desperdicio de la producción de mezcal en los municipios de Malinalco y Ocuilan en el Estado de México. Buscando plantear una alternativa para minimizar la tala de árboles usados en la producción de papel.

Particulares

- Proponer la utilización de bagazo de agave espadín que surge como desperdicio de la industria mezcalera en los municipios de Malinalco y Ocuilan en el Estado de México para producir hojas de papel a nivel laboratorio.
- Recopilar la bibliografía necesaria para producir hojas de papel a partir del bagazo de agave espadín y realizarles pruebas a las hojas de papel obtenidas (doblez, escritura, impresión, espesor, humedad, encolado, entre otras.)

JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de papel a nivel internacional ha provocado que la tala de árboles para la fabricación de este vaya en aumento y que la necesidad de obtener dicho material destruya cada vez más ecosistemas completos alrededor del mundo. Por lo que con el presente trabajo se propone una alternativa a nivel laboratorio para la producción de papel a partir de desechos de la industria del mezcal como lo es el bagazo del agave espadín (*Angustifolia Haw.*) para darle un uso más productivo a este desecho orgánico, ya que en la actualidad es utilizado para hacer composta o para quemarlo sobre los terrenos destinados al cultivo de agave espadín y que sirva como fertilizante para las nuevas plantas que crecerán. El bagazo, incluso termina por ser desechado en terrenos baldíos, lagos y ríos, convirtiéndose en un contaminante orgánico.

Al proponer la producción de hojas de papel a partir del bagazo del agave espadín, también se pretende minimizar el impacto ambiental en la deforestación de bosques.

RESUMEN

El presente trabajo consta de seis capítulos en los que se desarrolla el tema de la fabricación de hojas de papel a partir de bagazo de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) que es una especie de agavaceae de las 150 que existen en México y que fueron importantes en la vida cotidiana de las antiguas civilizaciones.

En primer capítulo es posible apreciar la importancia y el impacto que causó la invención de un material que hoy en día es tan común. En él se desarrolla la evolución histórica del papel desde sus inicios, mencionando y dando una breve explicación de la elaboración de sus antecesores: el papiro y el pergamino. Posteriormente se menciona que el papel nació en China y que su expansión se debió principalmente a los árabes y los cruzados, para después llegar a España en donde se introdujo el molino de agua para triturar la materia prima. Después su llegada a Francia y Holanda quienes fueron los principales proveedores de papel en aquella época, siguiendo con los italianos que aportaron la marca de agua y por último con los hermanos Henry y Sealy que proporcionaron la máquina Fourdrinier que es posiblemente el mayor avance en la industria papelera hasta nuestros días.

En el segundo capítulo se describe al agave espadín en cuanto a morfología, distribución geológica, principales usos y la descripción de los componentes fundamentales de la materia prima: celulosa, lignina y hemicelulosa. Así mismo permite conocer la fisiología del bagazo de agave espadín. Lo cual permite identificar al *Angustifolia Haw* de otras especies de agave como el *Tequilana*, *Rhodacantha*, *Americana var oaxacensis*, *Convallis*, *Cupreata* y muchos otros que a menudo se confunden con el espadín.

En el tercer capítulo se explica la clasificación de los métodos que se utilizan para producir pulpa para papel a nivel industrial (método mecánico, método químico y método semiquímico) los cuales dependiendo del que se elija para trabajar, influirán directamente en las propiedades del producto final. Dichos métodos sirven como base para manufacturar las hojas de papel de agave espadín. Además, se describen brevemente algunos de los procesos que conforman a estos métodos, por ejemplo, el proceso al bisulfito, proceso al sulfito neutro, el proceso Kraft, el proceso a la sosa, entre otros, mencionando algunas ventajas y

desventajas que poseen cada uno de ellos y con lo cual es posible tener un mayor entendimiento del por que se hizo uso de un método semiquímico a la sosa para elaboración de este trabajo.

El capítulo número cuatro relaciona directamente con la información descrita en el capítulo tres, ya que se retoma principalmente el método semiquímico y el proceso a la sosa.

Durante las líneas que lo conforma, se explica cómo se desarrolló este trabajo experimental. Primeramente, se introduce brevemente a la elaboración del mezcal, desde que la planta es cortada, siguiendo por la cocción de las piñas, después el fermentado y por ultimo la destilación. Posteriormente se describe e ilustra la obtención de la pulpa celulósica a partir del bagazo de agave espadín, mencionando las partes más importantes del proceso como lo son el astillado, la digestión de las fibras, el blanqueo y la formación de las hojas.

El capítulo cinco está destinado a explicar el cómo se desarrollaron las pruebas que se realizaron a las hojas de papel obtenidas, en las que se tomó como base para su aplicación las normas mexicanas NMX que aplican para la industria papelera y del cartón publicados en Diario Oficial de la Federación. Este capítulo permite tener una idea del uso al que se pueden destinar las hojas de papel obtenidas.

Algunas de las pruebas que se ejecutaron hacen referencia a las propiedades generales del papel, entre las cuales se encuentran: la prueba de la humedad (NMX-N-016-SCFI-2011), la prueba de espesor (NMX-N-009-SCFI-2011). Propiedades químicas, por ejemplo, prueba de encolado (NMX-N-SCFI-2006), prueba de pH (NMX-N-011-1965).

El sexto capítulo corresponde al análisis de los datos y resultados adquiridos tanto en la manufactura de las hojas de papel, como en la aplicación de las pruebas realizadas. En él se menciona los resultados obtenidos empíricamente y se comparan con los registrados en la literatura (ver anexo 2). También se mencionan posibles afectaciones o errores experimentales que se cometieron al realizar este proyecto. Al terminar de leer el capítulo numero seis es posible comenzar a concluir sobre los resultados que se obtuvieron de la realización de hojas de papel de bagazo a partir de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) y así mismo dictaminar el cumplimiento de los objetivos planteados al principio de esta tesis.

INTRODUCCIÓN

El papel ha sido uno de los materiales más antiguos inventados y usados por el hombre y que hoy en día se sigue utilizando, desde el primer momento en que una persona comienza su día hace uso de papel higiénico, posteriormente al almorzar necesita una servilleta para limpiar los restos de algún alimento, después en su jornada laboral se encontrará con información impresa y si necesita comprar algo debe utilizar el papel moneda, por mencionar algunos ejemplos cotidianos del uso de papel.

La demanda de este ha incrementado durante las últimas décadas, lo que ha provocado una sobreexplotación de los recursos naturales. Si bien es cierto que a menudo las estadísticas de consumo de papel per capita se citan como indicador del nivel de vida de un país, tristemente también se puede considerar como un indicador de la contribución de un país a la contaminación mundial de suelos, las aguas, la atmósfera, la tala de los bosques y la explotación de los recursos. Los bosques y selvas juegan un papel importante en la diversidad biológica de los ecosistemas, además regulan la temperatura del planeta porque tienen la capacidad de fijar y absorber un gas de efecto invernadero llamado dióxido de carbono (CO₂) que es generado por actividades humanas tales como los procesos industriales o el uso indiscriminado de combustibles fósiles (petróleo, gas y sus derivados como la gasolina).

La deforestación es un claro ejemplo del impacto ambiental que ha provocado la actividad humana, según la revista Forbes en su publicación *el futuro del papel está en las piedras*, en el año 2012 se talaron más de 70 millones de árboles para la industria papelera en México. La misma revista menciona que para producir una tonelada de papel se requiere talar 20 árboles que tienen 20 años y el uso de 75 000 litros de agua. En los últimos años se han buscado materiales alternativos para la producción de papel que sustituyan a las fuentes maderables y que a su vez permita minimizar el impacto ambiental derivado en gran parte por la tala de árboles.

En el presente trabajo de tesis se propone utilizar el bagazo de agave espadín (*Angustifolia*¹ *Haw.*) que surge como desperdicio de la industria mezcalera de los municipios de Malinalco y Ocuilan en el Estado de México, principalmente para la producción de hojas de papel haciendo uso de un proceso semiquímico de producción de pulpa alcalina a la sosa y sometiendo las hojas resultantes a algunas pruebas cualitativas (humedad, escritura, borrado, entre otras) basadas en algunas normas mexicanas NMX.

Dentro de este trabajo de tesis se describe el proceso para la obtención tanto del bagazo, como de las hojas de papel y sus respectivas pruebas, dando una breve explicación sobre cómo se realiza cada una de ellas.

¹ Del griego *angus* que significa angosto y que hace referencia a las angostas hojas o pencas del agave.

CAPÍTULO I HISTORIA DEL PAPEL

1.1. Evolución histórica del papel

El hombre siempre ha procurado dejar una huella de su existencia a través del tiempo, haciendo dibujos, jeroglíficos o pinturas. Para ello, anteriormente transmitía sus conocimientos o vivencias esculpiendo piedra o dibujando en las rocas de cuevas, posteriormente utilizó lápidas de arcilla en las que inscribía la información que pretendía conservar.

El papiro fue el precursor del papel, se usó durante mucho tiempo, inclusive se tienen registros de su uso desde el 2 400 A.C. en Egipto. Se hacía prensando el tejido medular de un junco llamado *Cyperus papyrus*. Las fibras gruesas de la planta eran descortezadas dejándolas entrecruzadas sobre una superficie dura y lisa, posteriormente eran prensadas hasta que se formaba una hoja. Después la superficie se alisaba frotando sobre ella un trozo de marfil o una piedra lisa.

El pergamino se usó durante mucho tiempo se fabricaba con la piel de los mejores animales, principalmente de becerros y corderos que no tuvieran ninguna enfermedad pues esto repercutía en la calidad final del papel. El proceso para su fabricación era largo. Primeramente, se debía lavar la piel con agua a temperatura ambiente durante 24 horas para posteriormente dejarla remojando en agua fría con cal, lo que provocaba la caída de pelo. Después de una semana de remojo, la piel era tendida en una plancha vertical para que se secara y que el fabricante raspase el pelo sobrante con una cuchilla. Posteriormente se debía volver a mojar y planchar, procurando eliminar los restos de carne para después dejarla remojando en agua fría y cal.

El secado final se hacía en un bastidor de madera que mantenía tensa la piel. En este punto, el fabricante podía hacer las reparaciones pertinentes al pergamino. Finalmente, el sol secaría el producto y durante este proceso se debería remojar y raspar progresivamente hasta obtener las finas láminas del pergamino.

El descubrimiento de hacer papel se les atribuye a los chinos y aunque no se conoce con exactitud la fecha, la mayoría de los historiadores la refieren al año 105 de la Era Cristiana,

cuando Ts'ai Lun, a quien particularmente se le acredita este hecho, informó al emperador de la época sobre dicho evento.

En este punto, la historia de cómo se hacía antiguamente el papel en China varía dependiendo del autor que se cite; por ejemplo (Libby, 1967) dice que el papel original en China se hacía con trazo, fibra de corteza y bambú. Describiendo que en el proceso los trozos de bambú se remojan durante más de 100 días y posteriormente eran hervidos en una lechada de cal durante 8 días, con la finalidad de liberar las fibras del bambú.

Por otro lado (Casey, 1990) menciona que los primeros papeles se hicieron a partir de la corteza interior de la morera de papel, y que en mayor escala a partir de bambú. Describe un proceso más largo y detallado; los tallos de bambú se cortaban cercanos al suelo, se clasificaban por edad de la planta y se recogían en atados. Los atados eran colocados en recipientes con agua y cieno para dejarlos enterrados en el fango durante dos semanas, con el objeto de ablandarlos. Después se cortaban y se colocaban en morteros con un poco de agua, donde eran machados con ayuda de grandes piezas de madera hasta que se obtenía la pulpa y ésta adquiría una consistencia adecuada para formar papel. En ese momento se extraía una hoja con ayuda de un molde construido de tiras de bambú y bajo ciertas especificaciones de tamaño. Una vez que drenaba el agua y se formaba una hoja de fibras entrelazadas, esta era puesta sobre un horno, quitando el molde y el papel quedaba adherido a la superficie del horno. Para terminar, se aplicaba una ligera capa de solución de cola de pescado o de alumbre para obtener un papel más liso y para papeles finos de escritura la superficie se pulía frotándolos con piedras lisas.

En el siglo seis los chinos establecieron una fábrica de papel en la ciudad de Samarkanda, misma que fue capturada en el año 704 por los árabes quienes aprendieron el arte de hacer papel e hicieron florecer la industria hasta el punto en que la ciudad de Samarkanda se reconocía como el lugar de origen de la elaboración de papel y para el año 795 lo introdujeron en su país, llevando consigo obreros chinos y estableciendo una fábrica en Bagdad. Los árabes introdujeron mejoras en el arte de fabricar papel, la más importante fue la sustitución de trapos de lino por fibras de madera.

Probablemente la extensión de hacer papel por Europa se debe a los cruzados quienes visitaron Palestina y Siria durante el siglo XII. Los moros manufacturaron el primer papel hecho en Europa, en España particularmente y que para el año 1085 tenía una fábrica en Toledo y después otra más famosa en Valencia. Los españoles también hicieron mejoras en la fabricación del papel, como la introducción de molinos de agua para accionar trituradores.

El papel se introdujo en Francia poco tiempo después que en España; para 1189 los franceses contaban con una fábrica en Essonnes y gracias a que prosiguieron con la fabricación de papel con destreza y entusiasmo pronto comenzaron a surtir las necesidades de la propia Francia y de los países circundantes. Éste hecho inspiró a la gente de los países bajos a seguir el ejemplo de Francia y con ello tanto franceses como holandeses fueron los mejores y casi los únicos productores de papel en Europa.

Por otro lado, en Italia se inventó el papel con marca de agua entre los años XIII y XIV, siendo cerca del año 1282 que apareció la primera marca de agua efectiva y constaba de una cruz. Tres años después dicha cruz se acompañaba por una letra *B* para señalar al fabricante del papel, lo que ha ayudado bastante en las investigaciones históricas subsiguientes.

El arte de hacer papel también se extendió a otros países como Alemania edificando fábricas papeleras en Nuremberg y Ravensburg, la primera se erigió en el año de 1336. Por el año 1450 el alemán Johannes Gutenberg inventó la imprenta en Estrasburgo, posiblemente la contribución alemana más importante a la industria papelera y gracias a esto la industria alemana del papel avanzó enormemente.

En el caso de Inglaterra las cosas fueron diferentes, los ingleses importaban todo el papel que utilizaban desde Francia, Inglaterra, España o Alemania. Fue hasta el reinado de Enrique VII cerca del año 1500 cuando comenzaron a producir papel ellos mismos. En 1498 la primera fábrica de papel fue instituida por John Tate quien era hijo de un alcalde de Londres y no tuvo el éxito esperado porque no se escuchó hablar mucho de su papelería. Tiempo después se construyó otra fábrica en Datford, propiedad de Spielman, un alemán que solo hacía papeles corrientes, sin embargo, sus esfuerzos fueron reconocidos por la reina Isabel de Inglaterra quien lo hizo caballero. A partir del año 1678, la fabricación de papel en Inglaterra comenzó a establecerse con fuerza y la cantidad de fábricas fue en aumento rápidamente.

Es notable que hasta este punto todo el papel que se fabricaba era hecho a mano sin importar la materia prima que se usara, una de las características de papel hecho a mano es que las fibras unidas se entrecruzan en todas direcciones debido a que el molde utilizado se podía agitar hacia cualquier lado y esto le da ciertas propiedades superiores al papel elaborado con máquina.

Durante este tiempo, la elaboración del papel en su totalidad era a partir de trapos viejos de algodón u otras telas lo cual representaba una serie de inconvenientes para satisfacer el volumen de producción demandado en el viejo continente ya que no siempre se tenía disponibilidad ni la cantidad suficiente de materia prima, además de los costos e impuestos sobre las mismas. Fue hasta el año 1720 que un francés de nombre Ferchault de Reaumur sugirió usar la madera como materia prima para la confección del papel.

Una de las desventajas a las que se enfrentó el proceso manual de fabricación de papel fue la limitada oferta de tamaños que se ofrecía en el mercado. Con base en las máquinas impresoras, a finales del siglo XVIII se comenzaron a realizar esfuerzos para superar dicha limitante y así desarrollar una máquina para producir papel ya fuera en hojas o rollos de longitud prácticamente ilimitada. En el año 1798 un francés, ayudante de impresión llamado Louis Robert desarrolló la primera máquina para producir papel en rollos que prometía longitudes de 12 a 15 metros, pero por dificultades financieras terminó por vender su patente a St. Leger Didiot quien era dueño de una fábrica francesa. Cuando Didiot buscaba capitalización de la patente en Inglaterra, conoció a Henry y Sealy Fourdrinier que eran comerciantes de papel en Londres y se interesaron en la idea de la máquina de papel, por lo cual contactaron al ingeniero Bryan Donkin para que trabajara en el proyecto.

En 1804 finalmente se lanzó e instaló la primera máquina para hacer papel que verdaderamente funcionaba y actualmente se conoce como la máquina Fourdrinier en honor a los hermanos Sealy y Henry. Fue este invento el que sin duda se puede considerar como el mayor acontecimiento individual en la evolución histórica de la fabricación del papel.

El problema de la escases de las materias primas terminó cuando en el año 1850 el alemán Friedrich Gottlob Sëller desarrolló un método para la obtención de papel a partir de la pulpa de la madera, el cual sería perfeccionada años más tarde por los métodos químicos para la

obtención de pulpas madereras tales como al sulfito y al sulfato. Gracias a estos descubrimientos la producción de papel a gran escala y precios económicos provocó la aparición y expansión de nuevos métodos químicos a nivel mundial y así mismo la cantidad de fábricas creció junto con la producción de papel terminado. Efecto de este exponencial crecimiento en la oferta de papel, tanto revistas como periódicos y libros aumentó de manera considerable.

En el siglo XX no existió una modificación considerable en cuanto a la producción de papel, sin embargo, la eficiencia y el costo sí que ha sido mejorado gracias al avance en nuevos materiales fibrosos y la optimización de procesos. Además de esto la diversidad de tipos de papel, cartón y materiales de embalaje que hoy se ofertan en el mercado es inmensa y cada uno de ellos se obtiene a partir de un proceso determinado.

Hoy en día se siguen haciendo investigaciones a nivel mundial con la finalidad de descubrir nuevos procesos o mejorar los ya existentes, así mismo para utilizar mayor diversidad de materias primas, tanto de especies vegetales nuevas y accesibles, como de desechos forestales o materiales reciclados.

CAPÍTULO II GENERALIDADES DEL AGAVE ESPADÍN (*ANGUSTIFOLIA HAW.*)

2.1. *Agave Angustifolia Haw.*

El género *Agave* (del griego *agaus* que significa *admirable* o *noble*) es endémico de América y está distribuido principalmente en ecosistemas áridos (ver apartado 2.1.2). Se conocen cerca de 200 especies, de las cuales 150 se encuentran en México y entre ellos el agave *Angustifolia Haw*² que además se le considera el ancestro de otras especies de agave como el henequén o el agave tequilero.

Los principales usos que se han dado a esta planta son de alimento, bebida y fibras, en la agroindustria para la producción de bebidas alcohólicas (mezcal) y la obtención de macromoléculas como fructanos (Granados, 1999, citado por Rosas, Y.). En la época prehispánica se hacía uso integral de la planta. De sus jugos se preparaban bebidas fermentadas con fines de rituales o para que los ancianos y las embarazadas lo consumieran; como medicina o para fabricar guisados y panes. De sus pencas se obtenían fibras vegetales que se usaban para hacer cuerdas, sogas y ropa y cuando las pencas se dejaban secar, se podían obtener remedios y fabricar un tipo de papel para elaborar los códices. De sus espinas se fabricaban clavos y agujas (Leyva 2005, citado por Montes, R)

Tabla 2.1 Clasificación taxonómica de la especie *Angustifolia Haw.* (Gentry, 1982)

Renio	Plantae
Phylum	Tracheophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Asparagales
Familia	Agaveceae
Género	<i>Agave</i>
Especie	<i>Agave angustifolia</i>
Nombre común	Maguey espadín

²Haw. Es una abreviatura que se emplea para indicar al botánico inglés Adrián Hardy Haworth como autoridad en la descripción y clasificación científica de los vegetales.

2.1.1. Morfología

El agave *Angustifolia* Haw. se caracteriza como una planta de tallo corto, con múltiples hojas parecidas a una espada y una roseta radial. Generalmente la altura de estos agaves es de 1 a 1.5 m de alto y de 1.5 a 2 m de diámetro.

Sus hojas son lineales, rígidas, con forma lineal o lanceolada, su color oscila desde verde claro hasta verde grisáceo, convexas hacia la base, estrechas, se angostan hacia la base y terminan en una espina que mide de 1.5 a 3.5 cm de longitud, esta es cónica, de color marrón o gris oscuro y su forma puede ser plana o acanalada hacia arriba, los márgenes de la hoja son de rectos a ondulados y en ellos se encuentran dientes regulares de color café oscuro que miden de 2 a 5 mm de longitud. (Gentry, 1972; García-Mendoza y Galván, 1995)

2.1.2. Distribución geográfica.

El agave *Angustifolia* forma parte de un gran número de comunidades vegetales en dunas costeras, selvas bajas caducifolias, bordes de selvas medianas subcaducifolias, diversos tipos de matorrales xerófilos, palmares y bosques de pino – encino, crece en alturas desde el nivel



del mar, hasta los 2 000 metros de altura aproximadamente (Peniche y Santamaria, 1993) Su distribución es la más amplia de todas, se puede encontrar desde Sonora y Chihuahua hasta la península de Yucatán (ver figura II-1) y continúa hasta Nicaragua.

Figura II-1 Distribución geográfica de agave espadín (Montes, R. 2014)

2.2. Fisiología del bagazo de agave espadín

De acuerdo con Rosas (2016) el bagazo está constituido por tejidos como parénquima, esclerénquima y haz vascular (xilema y floema) (ver figura II-2)

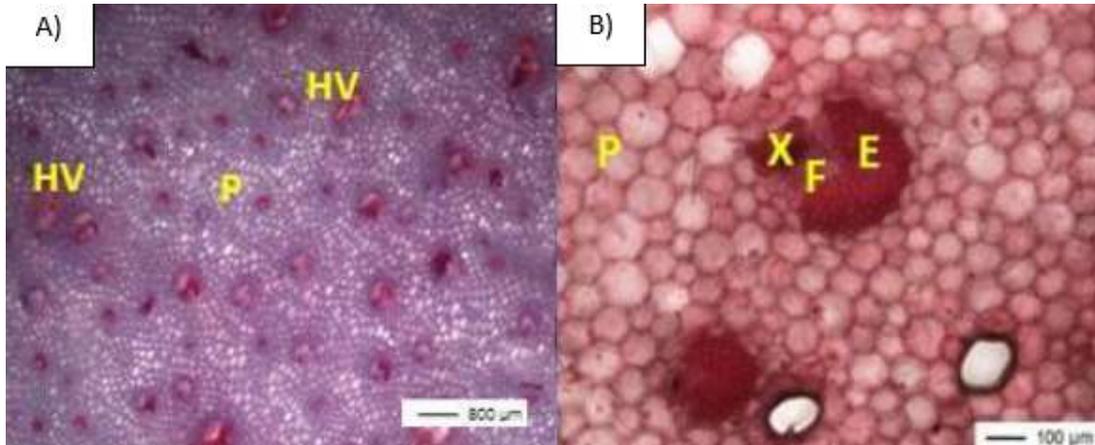


Figura II-2 Micrografías de tejido fresco de Agave. P: Parénquima, E: Esclerénquima, HV: Haz vascular, X: Xilema y F: Floema. A) Estereomicrografía. B) Micrografía. (Gumeta, 2009 citado por Rosas, 2016)

El *parénquima* (ver figura II-3) es un tejido que se compone de células con morfología y fisiología variable, que se diferencia poco y está asociado al xilema y floema, provisto de paredes primarias. La pared celular de este tejido es una red de microfibrillas de celulosa que está entrelazada con hemicelulosas dentro de un gel de pectinas. Su principal función en el agave es la de almacenar moléculas sintetizadas. (Esaú, 2008 citado por Rosas, 2016).

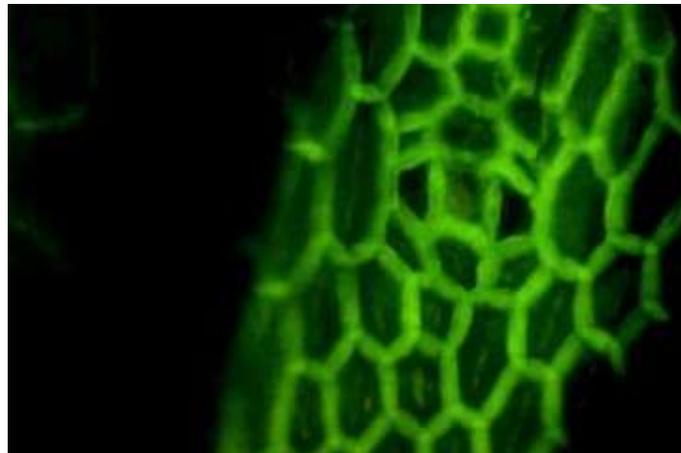


Figura II-3 Micrografías del parénquima del bagazo de agave *Angustifolia* Haw. (Rosas, 2016)

El *esclerénquima* es un tejido compuesto de células que carecen de protoplasma, que por lo general tienen paredes secundarias engrosadas y lignificadas, su principal función es

mecánica o de sostén. De la misma forma que el parénquima, el esclerénquima se asocia al xilema y floema (Carvajal, 1996; Esaú, 2008 citados por Rosas, 2016)

En la figura II-4 se observa al xilema y floema que son tejidos complejos relacionados con la conducción de agua y sustancias alimenticias respectivamente. Aparecen como cilindros sólidos y huecos o como cordones llamados haces vasculares y constituyen el sistema vascular de la planta.

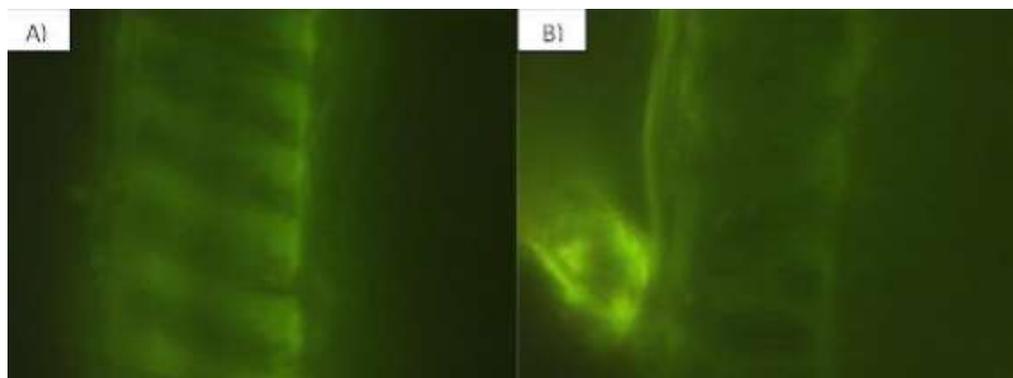


Figura II-4 Micrografía del bagazo de agave *Angustifolia* Haw. A) Xilema. B) Floema. (Rosas, 2016)

En cuanto a la composición macromolecular del bagazo de agave espadín se puede decir que todos los componentes anteriormente mencionados poseen una composición química diversa. En la figura II-5 se observa la celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina que constituyen al material lignocelulósico del bagazo de agave y que le confieren características principales tales como la rigidez, insolubilidad en agua y otras. (Rosas, 2016)

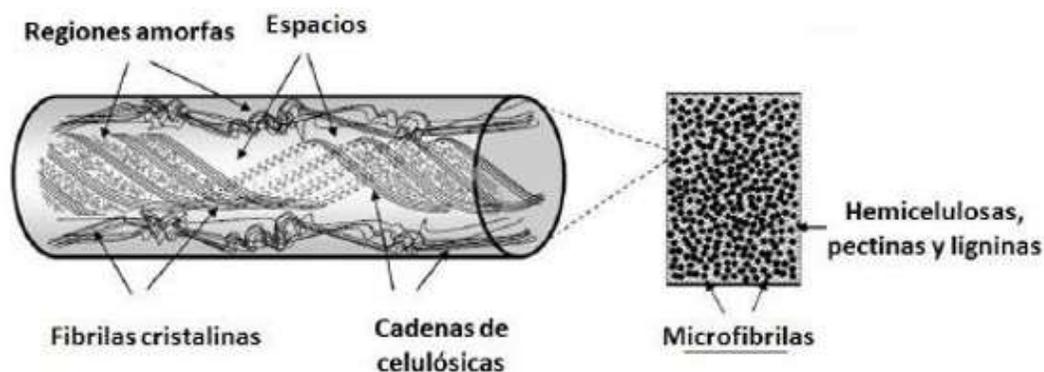


Figura II-5 Diagrama esquemático de la composición macromolecular de la matriz lignocelulósica (Bessadok y col., 2009 citado por Rosas, 2016)

2.3. Celulosa

La celulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n es el principal constituyente de la biomasa lignocelulósica del bagazo de agave, es un *polisacárido* que consta de una cadena lineal de monómeros (D-Glucosa) unidos por enlaces β -(1,4) que se estructuran en cadenas largas llamadas microfibrillas unidas entre sí por puentes de hidrógeno y fuerzas intermoleculares de Van Der Waals, formando una estructura cristalina y resistente a la hidrólisis y regiones amorfas susceptibles a la degradación enzimática (Osvando y Wallisweski, 2005, citado por Rosas Y. 2016)

La celulosa es altamente hidrofílica debido a la presencia de grupos polares OH⁻. Al entrar en contacto con el agua, moléculas de esta son absorbidas y las fibras se hinchan lo que resulta en una mejora de su flexibilidad y en la capacidad de enlazarse con otras fibras. Debido a que es más eficiente la absorción del agua en las regiones amorfas que en las cristalinas, estas últimas se intentan destruir por procedimientos usualmente mecánicos.

2.4. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un *heteropolisacárido* formado por monómeros de carbohidratos como hexosas (D-glucosa, D-manosa, D-galactosa), pentosas (D-xilosa, L-arabinosa), Desoxihexosas (L-ramnosa) y ácidos urónicos (D-ácido glucurónico, 4-O-metil-D-ácido glucurónico). Dichos heteropolímeros se adhieren a la superficie de las microfibrillas por puentes de hidrógeno a través de los grupos hidroxilo (OH⁻) de los azúcares que constituyen a la celulosa y hemicelulosa, mejorando la resistencia de la pared celular (Rosas, Y. 2016)

Durante el procesado de la pulpa, las hemicelulosas modifican drásticamente sus propiedades debido a que presentan cualidades más débiles que la celulosa y como son altamente solubles en distintos disolventes una gran proporción es retirada durante el procesado de la pulpa

2.5. Lignina

La Lignina es un polímero aromático unido a la hemicelulosa por medio de enlaces covalentes (Esaú 2008, citado por Rosas, Y. 2016) este compuesto es hidrófobo por lo que, en soluciones acuosas, no es posible retirarla a menos que se introduzcan en su estructura compuestos polares mediante reacciones químicas capaces de estabilizar las disoluciones de la lignina en agua. En ocasiones se utilizan compuestos derivados del azufre.

CAPÍTULO III MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA PULPA

Tanto la madera como otras plantas fibrosas son convertidas en fibras mediante distintos procesos que utilizan diversos equipos y máquinas, así como varias acciones que definen si las materias vegetales están siendo molidas, cocidas, digeridas, desfibradas, deslignificadas o refinadas para ser convertidas en pulpas celulósicas. Para la producción de papel, es necesaria la obtención de una suspensión de fibras celulósicas con características determinadas de tamaños de fibras, distribución de tamaños, composición, flexibilidad, resistencia, etc.

El proceso y el método a elegir para la confección de papel, depende de distintos factores para obtener la pulpa de características adecuadas y tratando de conseguir siempre el mayor rendimiento posible, sin embargo, posiblemente el más importante de ellos es el fin del producto terminado, es decir, el uso que se le quiere dar al papel o cartón fabricado teniendo en cuenta parámetros como la resistencia mecánica del papel a la rotura, al rasgado, al doblado, entre otros que le darán las características propias al producto final.

Generalmente los procesos para la obtención de las pulpas celulósicas dependen del autor al que se esté citando, pero la mayoría los clasifica de acuerdo con si se utilizan productos químicos o no. Es así como en este texto se clasifican los métodos como mecánico, químico y semiquímico, este último se puede decir que es una combinación de ambos. Además, en cada método se describe brevemente en que consiste y se enlistan los procesos más significativos con una explicación sencilla de su funcionamiento, de los reactivos que se usan y de las ventajas y desventajas que presenta cada uno.

3.1. Método Mecánico

Este proceso es probablemente el más antiguo, data de sus orígenes, es decir desde la invención del papel, se lleva a cabo forzando la madera contra una piedra que revoluciona a alta velocidad y en la cual se aprovecha prácticamente toda la fibra incluyendo tanto la celulosa como la lignina, sin embargo, la fibra se maltrata, se desgasta y su tamaño y

composición es heterogéneo. Este proceso se caracteriza por su bajo costo de producción y por la no intervención de un degradado químico de la fibra.

El proceso inicia con la entrega a la fábrica de la materia vegetal en longitudes y volúmenes establecidos para posteriormente colocarlos dentro de la prensa del molino y ser reducidos a la pasta mecánica por la piedra del mismo, en este punto se debe verter agua a la piedra y la pulpa para mantener una temperatura adecuada y después ser enviados desde la fosa del molino hacia los depuradores que eliminan los trozos y astillas relativamente grandes de los que son óptimos para continuar su camino en forma de solución diluida hacia los depuradores de finos. La pasta aceptada, se manda a los espesadores en donde se le da la consistencia adecuada para la formación del papel. Los molinos usados para desfibrar la madera son bastos, los más importantes son:

- **El molino de piedra** que consta de un disco que gira a grandes velocidades originariamente de piedra que frota a la madera para obtener partículas de tamaño muy pequeño. La fuente celulósica es presionada contra la piedra que se encuentra parcialmente sumergida en agua con la finalidad de bajar la temperatura provocada por la fricción con la madera. Con este procedimiento es posible obtener fibras celulósicas largas pero recubiertas de una capa de lignina con rendimientos muy altos (del 90 % al 95 %). Según (Caneda, 2003) los costes energéticos de una instalación de tamaño medio son de unos 1 500 kW·h por tonelada de pasta de papel producida, considerando rendimientos de madera del 90 %. Debido a que el gasto energético es muy alto, es necesario utilizar una energía de bajo costo como la hidroeléctrica, también se puede disminuir los costos de molido si se somete a la materia prima a un tratamiento previo con vapor de agua a presión durante un corto periodo para ablandarla. La pulpa producida por este método resulta en papeles de poca calidad con baja exigencia en términos de resistencia mecánica y blancura.
- **El refinador mecánico** se basa en la separación de fibras por medio de la cizalladura en un molino de discos de fricción hechos de metal, en donde uno es fijo y el otro gira a altas revoluciones, en sus caras comunes existen surcos o ranuras de profundidad variable, la separación entre ambos discos depende del tamaño inicial de

las astillas y del tamaño final deseado de las fibras separadas, esto se logra gracias a las tres partes más diferenciadas en las caras de los discos (ver figura III-1)

- Las barras rompedoras son profundas y anchas para romper las astillas de mayor tamaño.
- Las barras refinadoras son angostas y poco profundas dispuestas de forma paralela, en esta sección las astillas se reducen hasta el tamaño de una cerilla.
- Las barras finas tienen surcos estrechos y poco profundos, se encargan de producir las astillas del tamaño deseado final.

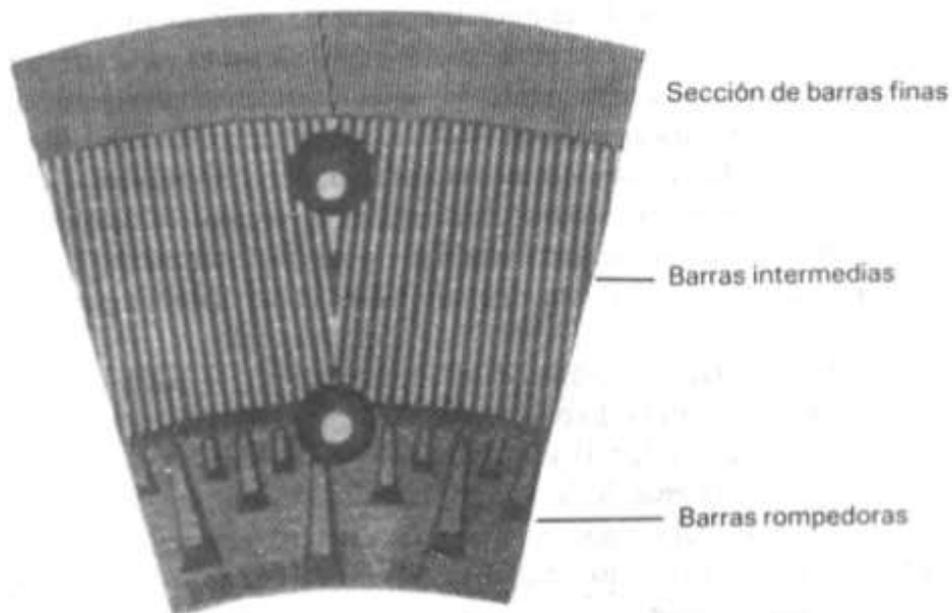


Figura III-1 Disposición de los elementos en un disco refinador (Caneda, J., 2003)

La pasta que se obtiene con el refinador es de mayor calidad que la que se obtiene con el molino de piedra debido a que se extraen fibras más uniformes porque el control es mayor. La separación de fibras ocurre en dos etapas: la primera es el fiberizado o desfibrado se lleva a cabo en las barras rompedoras y consiste en convertir la estructura inicial de la madera en fibras más sencillas y largas. La segunda etapa es la fibriliación que ocurre en las secciones de barras intermedias y finas del disco y

consiste en convertir las fibras obtenidas de las barras rompedoras en fibrillas y fragmentos de pared celular.

Con este proceso es posible obtener pasta celulósica con un alto rendimiento de aproximadamente 90 %, sin embargo, debido a que no se deslignifica y a que las fibras fueron sometidas a un agresivo proceso mecánico, se confecciona un papel de baja calidad, con poca resistencia mecánica y reversión del brillo por la acción de la luz solar. Debido a esos inconvenientes esta pasta está destinada para fabricar papel periódico y otros similares.

Una mejora que se le ha introducido a la producción de pasta con refinador mecánico es la producción de pasta termomecánica que consiste en instalar una unidad de vaporizado a la línea de entrada. En esta unidad se somete a las astillas a vapor de agua a presiones de entre 6 y 10 kg/cm² correspondientes a temperaturas de 165 y 185 °C lo que reblandece la lignina y las fibras se separan sin sufrir daño alguno, sin embargo, este tipo de pasta no es utilizable para producir papel, debido a que, al enfriarla, esta se endurece y provoca que la fibrilación sea casi imposible por lo que es más recomendable usar dicha pasta en la fabricación de tableros para construcción. Si se pretende usar la pasta termomecánica con fines de confección de papel, es recomendable no sobrepasar la temperatura de transición vítrea de la lignina.

- **Proceso Masonite** consiste en introducir las astillas en un digestor y calentarla a una presión alta durante poco tiempo y de inmediato liberar dicha presión mediante una válvula de apertura rápida. De esta manera las astillas se rompen y forman una masa fibrosa sin ser deslignificadas, así la lignina actúa como aglutinante y dicha pasta puede prensarse y obtener un producto con aplicaciones muy específicas.

3.2. Método Químico

Este método es capaz de transformar la materia prima en pulpa sin necesidad de utilizar acciones mecánicas en sus etapas con excepción del astillado, para lograrlo es necesario utilizar reactivos y métodos químicos selectivos capaces de provocar la separación efectiva de las fibras con la lignina.

-
-
- **Proceso al sulfito** descubierto en 1870 por B.C. Tilman se lleva a cabo mezclando las astillas previamente vaporizadas con licor de sulfito en un digestor que se calienta con vapor hasta la temperatura de cocción, posteriormente el vapor residual se retira hacia un acumulador para ser aprovechado, por otro lado, la mezcla de astilla y licor son descargados del digestor y se separa el licor gastado de la pulpa para ser regenerado y utilizado en sucesivos ciclos. La pulpa es cernida separando sólidos residuales.

Para obtener el licor primeramente se quema azufre para producir óxido de azufre (SO_2), a continuación, se enfría y se absorbe en una disolución acuosa que contenga alguna sal básica (carbonatos, hidróxidos o sulfitos de metales alcalinos).

Para regular el pH y aumentar la eficiencia del licor de cocción es necesario utilizar una base, la cual es muy importante, puesto que de ella depende los rangos de temperatura y pH que se utilizarán durante la operación, por lo tanto, es importante dar una breve descripción de las bases que se pueden ocupar:

- **Base de calcio.** Es obtenida de piedra caliza y resulta ser barata y de alta disponibilidad, sin embargo, el mayor problema de su utilización es que la solubilidad del Sulfito de Calcio (CaSO_3) en función de la temperatura muestra un comportamiento inverso, como consecuencia, el intervalo de pH a los que se pueden operar es condicionado, aunado a esto se puede presentar incrustaciones sólidas de sal, sulfato o carbonato en los elementos calefactores y por último la recuperación de los reactivos resulta difícil.
- **Base de magnesio.** Los intervalos de pH de operación con esta base son superiores a los del calcio debido a la mayor solubilidad del sulfito de magnesio (MgSO_3) pero el reactivo que más se suele utilizar es el hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ya que el carbonato reacciona más lento con el dióxido de azufre, además la recuperación de los reactivos es relativamente sencilla quemando los licores en un horno obteniendo óxido de magnesio y dióxido de azufre.

-
-
- **Base de sodio.** La gran solubilidad del sulfito de sodio y bisulfito de sodio permiten que la absorción del dióxido de azufre como la producción de la pulpa se simplifiquen ya que durante la operación no se presenta la precipitación. Obtener la base de sodio puede ser fácil a partir de la sosa cáustica (NaOH) o de las cenizas de sosa (NaCO₃). Sin embargo, la recuperación de los reactivos resulta más complicada que con una base de magnesio porque se utilizan compuestos de azufre reducidos que resultan en emisiones nocivas para la salud.
 - **Base de amonio.** Se utiliza el sulfito de amonio ((NH₄)₂SO₃) y el bisulfito de amonio ((NH₄)HSO₄) que son solubles en todo el intervalo de pH y que se pueden obtener fácilmente a partir de amoníaco líquido anhidro por disolución, siempre y cuando se cuente con las instalaciones especiales de descarga y mezcla para evitar la fuga de vapores durante el proceso de absorción con SO₂. Con respecto a la otras, esta base presenta la mayor velocidad de deslignificación debido a su pH ácido, pero a consecuencia de eso, se obtienen pulpas oscuras. La recuperación del dióxido de azufre es complicada y el amoníaco no puede recuperarse porque pasa a nitrógeno gaseoso durante la incineración y esto provoca un elevado gasto de reactivos químicos.
 - **Sin base.** En este caso se simplifica el proceso de producción de la pulpa y al mismo tiempo soluciona los problemas de incrustaciones de sólidos, evita la presencia de cenizas y facilita la recuperación de SO₂, pero se produce una corrosividad alta, se debe enfriar el licor para la recuperación y se necesita una alta presión parcial de SO₂ para desplazar el equilibrio hacia la formación del bisulfito que es necesario para la sulfonación de la lignina.

El proceso al sulfito inicialmente no fue utilizado debido a la alta corrosión que provocaba en los equipos y fue hasta unos años más tarde que se comenzaron a construir digestores de cerámica que se calentaban con vapor directo y con ello se convirtió en el método dominante de producción de pulpas químicas. Generalmente este método ofrece un alto rendimiento, bajo costo en los reactivos (con respecto a los métodos alcalinos), alta blancura en las pulpas

no blanqueadas y facilidad para blanquear pulpas con agentes de fácil disponibilidad, por el contrario, sus desventajas son un número reducido de especies leñosas en las que se puede emplear, así como una reducida resistencia de la pulpa con respecto a otros métodos.

- **El método Kraft o al sulfato** sustituyó al proceso al sulfito, fue descubierto en el año 1879 por Dahl quien observó que el álcali perdido en el proceso a la sosa se sustituía por sulfato de sodio en vez de carbonato de sodio, el sulfato se reduce a sulfuro en la incineración del licor gastado, por lo que realmente los agentes activos en el proceso son el sulfuro sódico y el hidróxido sódico y no el sulfato (Casey, 1990)

La denominación Kraft proviene del alemán que significa fuerte debido a la alta resistencia que se obtiene de la pulpa. Aunque no se conoce con certeza las reacciones que se llevan a cabo durante este método debido a la variedad de compuestos presentes en el medio reactivo y a la complejidad de la estructura de la lignina, se sabe que la presencia del sulfuro acelera la disolución de la lignina sin que aumente la degradación de la celulosa.

Durante el proceso de digestión es aconsejable una íntima mezcla entre las astillas y el licor, lo cual se consigue vertiéndolas simultáneamente y así mejorar las propiedades lubricantes del licor. Sumado a esto, es necesario que la mezcla dentro del digestor sea perfecta para asegurar la igualdad de la cocción en todo el volumen y el producto final sea lo más heterogéneo posible para evitar un elevado rechazo de las astillas grandes en la etapa de cernido. Las temperaturas que se alcanzan en el digestor son entre 160 y 180 °C y deben ser constantes durante toda la cocción para después enviar la mezcla de pulpa y astillas a una etapa de separación, donde las astillas grandes son devueltas al digestor y la pulpa pasa a una etapa de lavado. Por otro lado, el licor negro pasa al ciclo de regeneración.

Aunque el proceso Kraft puede ser utilizado en casi todo tipo de maderas, son las maderas duras las que mejor resultado ofrecen. Algunas características que lo han convertido en el proceso más usado actualmente son la posibilidad de utilizar cualquier especie de madera, breves tiempos de cocción, menores deposiciones sólidas, excelente resistencia de la pulpa, obtención de productos secundarios de gran

valor como la trementina y tall oil, este último es utilizado en la fabricación de pinturas y ésteres epóxicos. La figura III-2 representa un esquema general del proceso Kraft incluyendo la recuperación de los licores.

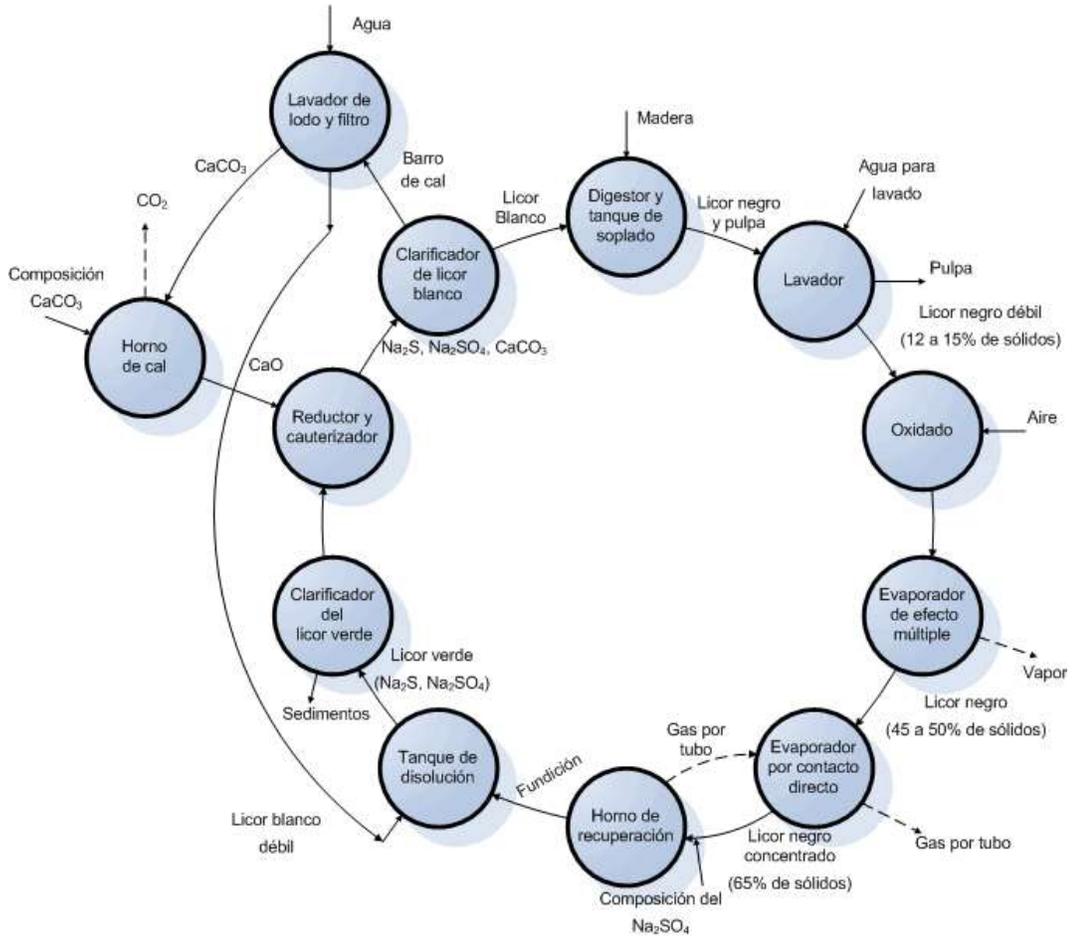


Figura III-2 Proceso Kraft de obtención de pulpa y ciclo de recuperación (Caneda, J. 2003)

3.3. Método Semiquímico

Este tipo de procesos implican procedimientos en donde se utilizan etapas de tratamiento químico y procesado mecánico de forma complementaria, lo que les da a las pulpas resultantes las ventajas tanto de las pulpas químicas como de las mecánicas

- **El proceso a la sosa fría** es el proceso semiquímico más antiguo que consiste en remojar las astillas en una disolución de sosa a temperatura ambiente durante un

periodo de tiempo de entre 30 y 120 minutos dependiendo de la materia fibrosa que se utiliza, de esta forma las astillas se ablandan ya que se acelera la absorción en las hemicelulosas y las zonas amorfas de la celulosa, produciendo una hinchazón de las mismas lo que debilita su estructura y por ende se manifiesta un desprendimiento de las fibras. En este proceso no se recomienda sobrepasar una temperatura de 25 °C para evitar la formación de color oscuro en la pulpa.

El rendimiento esta entre el 87 % y 92 % para maderas duras y el gasto de sosa es aproximadamente del 6 % por cada tonelada de pulpa para la elaboración de papel periódico también es evidente el ahorro en el gasto energético que se realiza en la fibrilación con un proceso mecánico. Además, los licores que se utilizan para impregnar las astillas pueden ser reutilizados durante 15 o 20 ciclos sin que se presente coloración oscura en la pasta. Debido a las mejores propiedades obtenidas en la pulpa por otros métodos similares, este proceso está prácticamente en desuso.

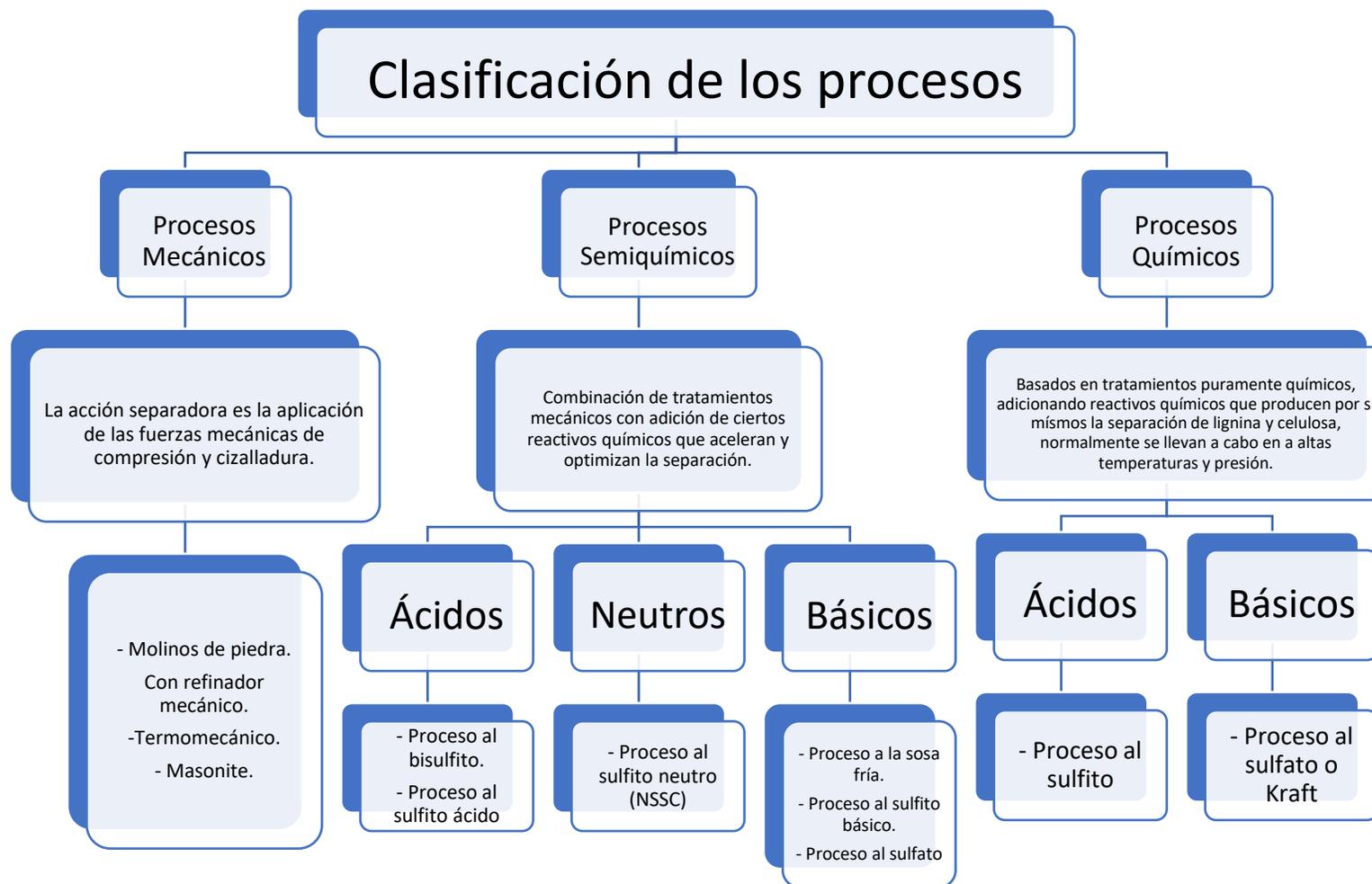
- **El proceso al sulfito básico** utiliza para la extracción un licor compuesto de sulfito sódico (NaSO_3) y una serie de compuestos como el carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S) que regulan el pH del medio en valores entre 9 a 12 con temperaturas entre 130 y 170 °C La acción del sulfito en medio básico es acelerar la hidratación de la celulosa y ablandar la madera produciendo pulpas más blancas y papeles más resistentes que con el proceso a la sosa. El rendimiento estimado en este proceso es del 60 %
- **El proceso al bisulfito** emplea bisulfito de sodio para promover la deslignificación previo al refinado mecánico final. Se produce una sulfonación sobre las moléculas de lignina por acción del bisulfito, lo que genera ácidos lignosulfónicos más hidrofílicos para que la fibra se hinche al absorber el agua y se debilite la estructura de las astillas. Es muy importante que, durante la etapa de digestión con bisulfito, el pH se mantenga con valores constantes de entre 4 y 6 para obtener pulpas más blancas y resistentes, además de presiones de entre 5 y 10 kg/cm^2 y en ausencia de aire. Otro aspecto importante es al usar este método es que la temperatura de transición vítrea de la lignina que normalmente es de 120 a 150 °C disminuye drásticamente un intervalo entre 70 a 90 °C debido al cambio ocasionado en la estructura de la lignina.

-
-
- **El proceso al sulfito ácido** emplea una disolución de sulfito de sodio con dióxido de azufre (SO₂) para sulfonar intensamente las moléculas de lignina y producir que sea más soluble en agua y facilitando su separación. Este método se compone de distintas etapas, la primera de ellas requiere impregnar las astillas con licor a presión atmosférica y valores de pH entre 1.5 y 2.0 por aproximadamente 60 min. En la segunda etapa se vaporiza en un digestor a aproximadamente 120 °C. El rendimiento obtenido por este método está entre el 60 y el 70 %.
 - **El proceso al sulfito neutro (NSSC³)** fue descubierto en el año 1874 y empleado en el año 1922 por la primera fábrica. Es muy similar al sulfito ácido, pero con la desventaja de que a condiciones neutras la velocidad del proceso se reduce y la cantidad de reactivos aumenta, sin embargo, se obtienen pulpas de mayor blancura y resistencia. Como su nombre lo dice, este proceso, se desarrolla a pH neutro y para mantenerlo en esos intervalos, se utiliza un tampón con base de bicarbonato sódico en tal cantidad que sea capaz de neutralizar los ácidos orgánicos creados en la digestión que se lleva a cabo a una temperatura de 120 °C, posteriormente la mezcla de astillas y pasta son introducidas a un refinador mecánico con la finalidad de desfibrarlas, procurando no ocasionarles daño a las fibras.

Este proceso es el más utilizado de entre todos los métodos semiquímicos porque se obtienen productos muy superiores a los de los demás métodos, también porque la recuperación de los reactivos es más sencilla y económica y porque además al usar pH neutros, el costo de los equipos disminuyen al no necesitar materiales resistentes a la acidez o alcalinidad. El rendimiento de la pasta obtenido con el método NSSC es variable de acuerdo con el tipo de pasta que se desee obtener. En la figura III-3. se muestra un esquema de la clasificación de los métodos utilizados para confeccionar papel, además, se describe el principio de separación de las fibras en cada caso y algunos de los procesos más utilizados en la industria que incluye cada uno de estos.

³ NSSC se refiere a sus siglas en inglés Neutral Sulfite Semi Chemical

Figura III-3 Clasificación de los procesos para obtención de pulpa celulósica (realizada por el autor)



CAPÍTULO IV ELABORACIÓN DE LAS HOJAS DE PAPEL

La experimentación para fabricar hojas de papel de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) se desarrolló en el laboratorio experimental del Laboratorio Experimental Multidisciplinario (LEM) en la nave 1000 de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán en su Campus 1 (FES C-1), en donde la presión atmosférica de 585 mmHg.

Para la obtención de pulpa celulósica se optó por desarrollar un método semiquímico y un proceso a la sosa debido a que el costo de la producción es más económico que usar otro tipo de método y de proceso, además los reactivos utilizados son de fácil disponibilidad. Otro factor que influye en la elección de este es que el rendimiento obtenido de la fibra es alto y la materia prima utilizada es una fuente no maderable.

De acuerdo con (Casey, 1990) se recomienda utilizar este tipo de procesos para fibras no maderables.

4.1. Material, equipo, reactivos y servicios

Equipo	Material		Reactivos	Servicios
1 Termobalanza	1 Termómetro de vidrio	1 Espátula	Hidróxido de sodio (NaOH)	Corriente eléctrica
1 Licuadora	Tiras para medir pH	5 Botes plásticos de 19 L	Ácido muriático (HCl)	Agua (H ₂ O)
1 Molino de mano	3 m manta de cielo	Tijeras	Hipoclorito de sodio (NaClO)	
1 Parrilla	2 m papel pellón	Guantes de nitrilo	Cal (Ca ₂ CO ₃)	
1 Prensa mecánica	1 Agitador de madera	Bata	Pegamento blanco	
1 Bastidor o molde de madera	2 Crisoles	Gafas de seguridad		

1 Balanza analítica	1 Pinzas para crisol			
1 Reactor metálico	10 vasos para precipitados de 500 mL			
1 mufla	1 gotero			
1 micrómetro	1 cronómetro			

4.2. Procedimiento experimental

El material que se utilizó en esta experimentación fue recolectado de fábricas locales que producen mezcal en los municipios de Malinalco y Ocuilan del Estado de México. Al realizarle pruebas de humedad, se registró que tenía un porcentaje del 47.6 % aproximadamente, además era visible la presencia de lodo, composta y otros materiales ajenos al bagazo, por lo cual fue necesario realizar un lavado previo y retirar de manera manual la mayor cantidad de dichas contaminaciones.

En la tabla (4.2) se definen los conceptos que ayudarán a entender el proceso de manufactura de las hojas de papel.

Astillado	Es la acción de reducir las fibras de la materia prima a un tamaño deseado y uniforme previo a la etapa de digestión.
Blanqueo	Consiste en la eliminación de los componentes cromofóricos mediante una reacción química con algún agente blanqueador.
Desfibrado	Consiste en convertir la estructura inicial de la materia prima en fibras más sencillas y largas
Desfibrilado	Es una etapa posterior al desfibrado, consiste en convertir las fibras procedentes del desfibrado en fibrillas que son más cortas y sencillas.
Digestión	Se refiere al ataque químico que se le realiza a la materia prima que en este caso es el bagazo de agave espadín para desprender las fibras y facilitar el posterior desfibrado.
Lavado	Se puede definir como la acción de retirar los excedentes de agentes ajenos a la pulpa como las impurezas, los licores de la digestión, el agente blanqueador, entre otros, haciendo uso de un solvente inerte con la pulpa como el agua.

Mezclado	El mezclado se refiere a la acción de homogenizar e integrar tanto las cargas como los aditivos en la solución de la pulpa.
Molienda	Es la separación de fibras utilizando métodos mecánicos.
Prensado	Es la acción de presionar la hoja de papel resultante para eliminar la mayor cantidad posible de humedad.
Secado	Se le llama secado a la extracción de la humedad que se queda atrapada en los capilares de la fibra.

4.2.1. Obtención del bagazo de agave espadín

El bagazo del agave espadín es un desecho orgánico que se obtiene de la industria mezcalera. Para llegar hasta este punto, es necesario cosechar la planta en su madurez, es decir, cuando tiene entre 6 y 8 años de vida (ver figura IV-1.), ya que es en ese momento cuando se considera que la planta tiene un alto contenido de azúcares que pueden ser aprovechados por los microorganismos para la generación de alcohol y la obtención de un mezcal de buena calidad.

Una vez extraídas las plantas, se procede a quitarles las pencas para obtener únicamente *la piña* que es en donde se concentran los azúcares necesarios para producir la bebida alcohólica, además de que las pencas, raíces y otros productos ajenos a la piña podrían desencadenar sabores no gratos al paladar.



Figura IV-1 Agave Angustifolia
Haw. (capturado por el autor)

Las piñas son cortadas por la mitad y cocidas en un horno hecho de tabique bajo la tierra que se precalienta durante 4 horas. En la parte más profunda del horno se coloca una mezcla de madera de encino y pino apilando leño sobre leño en forma rectangular, sobre la madera se ponen piedras de tamaño medio que comúnmente son de río capaces de soportar la temperatura requerida para la cocción⁴ (800 a 1000 °C), posteriormente las piñas son colocadas sobre las piedras de río tomando en cuenta su tamaño, las más grandes primero y las más pequeñas después, se tapa con palma y tierra manteniendo su cocción durante aproximadamente 72 horas (ver figura IV-2), vigilando que el horno se mantenga bien cubierto en todo momento para evitar que le entre oxígeno y provoque que las piñas se quemem

La cocción se ve influenciada por tres factores:

- Cantidad de leña.
- Acomodamiento de la leña.
- Cantidad de piedras.



Figura IV-2 Llenado del horno con las piñas (autor desconocido)

⁴ La mezcla de maderas y la utilización de otro tipo de piedras distintas a las de río, depende del sabor que se quiera dar al mezcal, así mismo los hornos también pueden ser construidos con piedra volcánica u otros materiales.

Terminado el proceso de cocción, las piñas son cortadas o rajadas en trozos más pequeños y se remojan durante 24 horas con la finalidad de ablandarlas para posteriormente ser trituradas o machacadas con un mazo de madera o en otros casos con un molino egipcio que consta de una rueda de piedra de 500 kg unida a un eje y que es tirada por un caballo como se muestra en la figura IV-3, a este proceso se le conoce también como *majar* las piñas.



Figura IV-3 Triturado de las piñas (autor desconocido)

Una vez terminado el proceso anterior se procede a la etapa de fermentación que es en donde los azúcares contenidos en la piña se transforman en etanol por medio una ruta metabólica propia de las levaduras, dicha operación se lleva a cabo en recipientes de plástico (tambos) o tinas de madera⁵ como se observa en la figura IV-4 y necesita de aproximadamente ocho o diez días para que termine esta etapa dependiendo de la temperatura ambiente. Las etapas en las que consiste el fermentado son las siguientes.

- **Promoción de la fermentación.** En esta etapa se adiciona agua caliente con la finalidad de crear un ambiente apropiado para el crecimiento de microorganismos y se deja reposar durante 24 horas para alcanzar el punto apropiado de seguir con la siguiente etapa
- **Ajuste de microorganismos.** Se agrega agua fría para evitar que los microorganismos se reproduzcan más de los necesarios y que no exista una

⁵ Se tiene registro de que los recipientes para fermentar las piñas, también se pueden construir de piel de res, acero inoxidable u otros materiales.

fermentación acelerada que de origen a la formación de ácido acético. Para continuar con la etapa siguiente es necesario esperar dos horas y media.

- **Revoltura.** Controlada la proliferación de microorganismos, es necesario homogeneizar la mezcla, de tal forma que no existan zonas en donde la fermentación sea poca o nula. Después de realizar esta operación se necesita esperar aproximadamente 36 horas para continuar con la siguiente etapa.
- **Detención de la fermentación.** Como su nombre lo dice, en esta etapa se minimiza los mayormente posible el trabajo de fermentación. Para lograrlo, es necesario permitir la entrada de oxígeno a los recipientes de fermentación.



Figura IV-4 Recipiente para fermentación (autor desconocido)

Ya que las piñas están fermentadas, se llevan al proceso de *destilación* en donde se efectúa la separación de alcohol y agua aprovechando sus distintos puntos de ebullición (para agua: 100 °C, para etanol: 78.5 °C a nivel del mar). El equipo que se utiliza es un alambique fabricado de cobre (ver figura IV-5) que debido a su alta conductividad térmica facilita la transferencia de calor. Las partes que conforman al alambique son:

- **La olla** que contiene la mezcla de sustancias a separar se encuentra enterrada en una estructura cúbica y debajo de ella se coloca leña encendida que genera el calor necesario para la separación.
- **La montera o campana** que se encarga de captar los vapores generados tras el calentamiento en la olla y los conduce hasta la siguiente sección.

-
-
- **El turbante** es un tubo alargado y tiene como finalidad conducir los vapores hasta la sección de enfriamiento.
 - **El serpentín** es un tubo en forma de espiral que está inmerso en un tanque con agua y que tiene la finalidad de enfriar y por lo tanto condensar los vapores procedentes de la olla



Figura IV-5 Alambique de cobre (autor desconocido)



Figura IV-6 Campana y serpentín del alambique (autor desconocido)

Para armar el alambique de forma correcta como en las figuras (IV-5 y IV-6) es necesario sellar perfectamente todos los sitios de conexión con una pasta proveniente de residuos del maguey llamada *masilla*, con la finalidad de que no se escape el vapor, que además de causar pérdidas, también genera una caída de presión provocando que el mezcal salga con menor

fuerza y retrasando la operación. También es importante mantener un control en la temperatura para evitar repercusiones negativas en la obtención del mezcal.

El proceso de destilación se realiza en dos pasos; el primero de ellos se conoce como *caldeada*, la cual se refiere al primer destilado en donde se obtienen generalmente tres tipos de garrafrones: el primero de ellos se conoce como *punta* y tiene una graduación alcohólica de 60° L.C. los dos restantes se les conoce como *xixe* y su graduación alcohólica es de 30°

Posteriormente seguirá el segundo destilado que también se conoce como *refinado* en el que se ocupan los garrafrones denominados *xixe* ya que su graduación es muy baja para poder envasarlo (43°). las condiciones para llevar a cabo el refinado son muy similares a la destilación anterior. Finalmente, el producto se deja enfriar hasta temperatura ambiente para ser envasado y vendido en presentaciones como las de la figura IV-7 que sean acordes a las necesidades del consumidor.

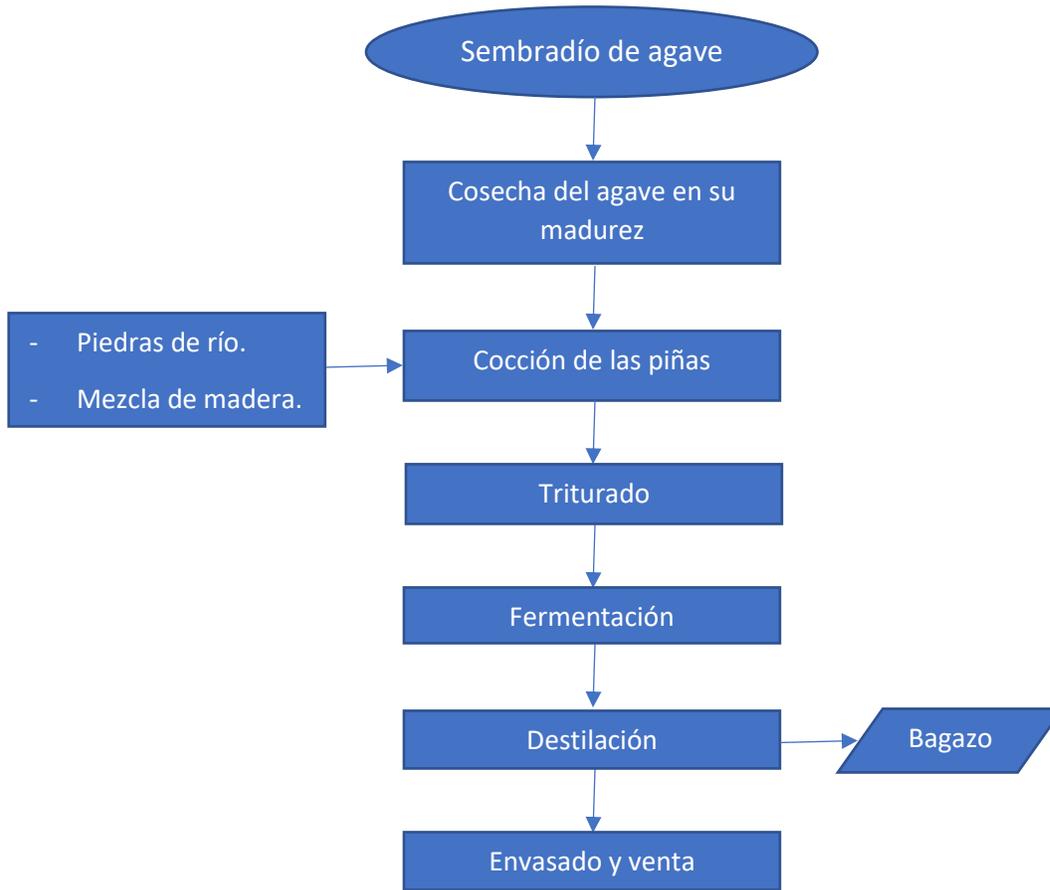


Figura IV-7 Mezcal envasado (autor desconocido)

Después de obtener el producto de interés, las fábricas de mezcal utilizan el bagazo considerado un residuo como combustible para el horno o el alambique y en el mejor de los casos lo dejan a la intemperie por aproximadamente un año para que se forme *composta* y la vendan a viveros o la utilicen en sus plantíos de agave.

El siguiente diagrama resume de forma general el proceso de la fabricación artesanal de mezcal.

Diagrama de bloques para el proceso de fabricación de mezcal



4.2.2. Obtención de la pulpa celulósica

La primera parte para conseguir una pulpa celulósica es la *recolección* de la materia prima, que en este caso es el bagazo de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) que se muestra en la figura IV-8 y que se recogió de fábricas de producción artesanal de mezcal en los municipios de Malinalco y Ocuilan en el Estado de México.



Figura IV-8 Bagazo de agave espadín (capturada por el autor)

Una vez recolectado el bagazo, se procedió a un primer *desfibrado* manual (ver figura IV-10) de las pencas que aun conservaban su forma y la mayoría de las fibras que estuviesen pegadas por la acción de los azúcares que se caramelizan al cocer las piñas en la etapa de elaboración del mezcal. Ya que las fibras fueron separadas, se procedió a la etapa de *astillado* haciendo uso de tijeras de costura para lograr un tamaño de fibras de entre uno y dos milímetros de longitud (ver figura IV-9) con la finalidad de que la *digestión* se realice en menor tiempo y que los licores impregnen con mayor facilidad a las fibras, lo que resultará en una mejor *deslignificación* y a su vez en una disminución de energía mecánica en la etapa de la segunda *desfibrilación* y del *desfibrado*.



Figura IV-9 Bagazo Astillado (capturado por el autor)



Figura IV-10 Desfibrado manual (capturada por el autor)

Posteriormente se le realizó una prueba de humedad con una termobalanza (ver figura IV-11) y se pesó 459 g de sosa cáustica grado comercial en hojuelas por cada kilogramo de bagazo en base seca.



Figura IV-11 Prueba de Humedad a la materia prima (capturada por el autor)

El bagazo se vertió en un recipiente metálico al cual se le añadió 7 L de agua del grifo y la sosa que se pesó anteriormente. Después y con ayuda de una parrilla se llevó y mantuvo en digestión durante 4 horas a una temperatura de 85 °C y a presión atmosférica como lo muestra la figura IV-12.



Figura IV-12 Digestión del bagazo (capturado por el autor)

Después de terminar la digestión de la pulpa, se procedió a *lavarla* con agua de servicio a temperatura ambiente para retirar el exceso de los licores de sosa, hasta que ya no se percibiera una consistencia jabonosa (figura IV-13). Una vez que la pulpa se terminó de lavar, esta fue llevada a un proceso de *molienda* con un molino de mano que al mismo tiempo *desfibriló* la pulpa y mejoró la manipulación de esta (figura IV-14).



Figura IV-13 Lavado y filtrado de la pulpa (capturada por el autor)



Figura IV-14 Pulpa antes y durante el molido (capturada por el autor)

La pulpa molida fue puesta en suspensión acuosa para después hacer más pequeñas las fibras con ayuda de una licuadora (figura IV-15) y conseguir un tamaño óptimo para que las fibras pudiesen entrelazarse unas con otras y así facilitar la etapa de formación de la hoja.



Figura IV-15 Licuado de la pulpa (capturada por el autor)

Para *blanquear* la pulpa se vertió 3 L de hipoclorito de sodio al 4.2 % y se mantuvo durante 24 horas en reposo, para optimizar la acción de retirar la mayor cantidad de componentes cromofóricos presentes en la pulpa (figura IV-17). Ya con la pulpa blanqueada, nuevamente

se lavó con agua de servicio hasta retirar la mayor cantidad de hipoclorito de sodio y se agregó como aditivo 12 mL de pegamento blanco y 10 g de Ca_2CO_3 como carga, manteniendo un *mezclado* de aproximadamente dos minutos (figura IV-16).



Figura IV-16 Agregado de aditivos y cargas (capturada por el autor)



Figura IV-17 Blanqueo de la pulpa (capturada por el autor)



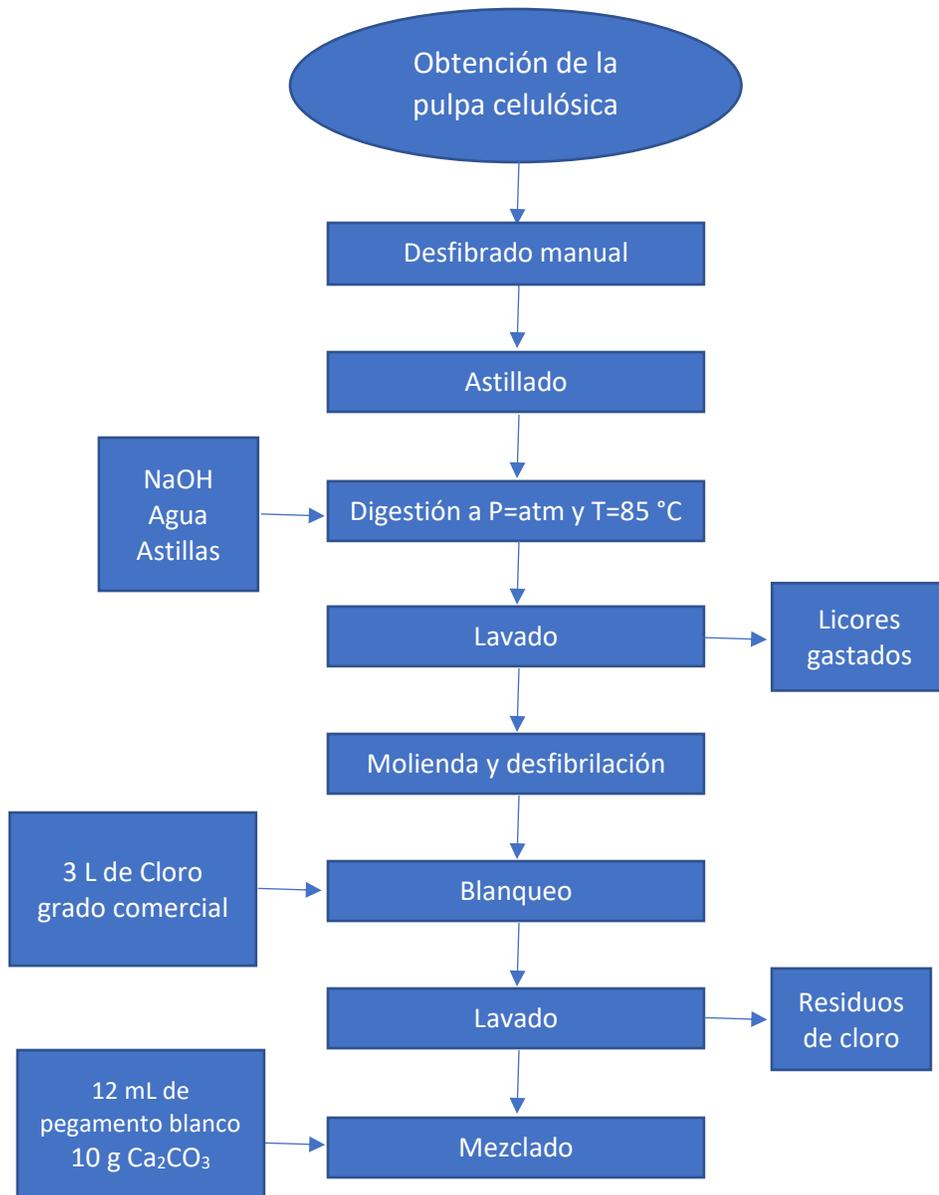
Figura IV-18 Pulpa lista para formar hojas (capturada por el autor)



Figura IV-19 Lavado de la pulpa blanqueada (capturada por el autor)

En el siguiente diagrama de bloques, es posible resumir el proceso de obtención de la pulpa celulósica por un proceso semiquímico a la sosa desde la etapa de desfibrado manual hasta la etapa de mezclado de la pulpa con las cargas y los aditivos utilizados.

Diagrama de bloques para el proceso de obtención de la pulpa celulósica



4.2.3. Formado de la hoja y secado de la hoja

Tras dejar la pulpa en solución durante 24 horas como lo muestra la figura IV-20 , se procedió a la etapa de *formación de la hoja* y esto se realiza con un molde o bastidor hecho de madera y con una tela en el fondo que permita el *drenado* del agua por gravedad, también es necesario contar con un segundo marco de madera con las mismas medidas que el bastidor, pero sin que tenga una tela como el anterior (ver figura IV-21). Para este caso las medidas del molde fueron de 23x24 cm



Figura IV-20 Molde para formación de hojas
(capturada por el autor)



Figura IV-21 Pulpa celulósica en solución
(capturada por el autor)

El proceso comienza limpiando los restos de pasta o de alguna otra impureza el molde de madera y posteriormente este se sumerge en agua a temperatura ambiente durante 10 o 15 minutos para que la mayoría de los poros se expanda y facilite el drenado del agua. Posteriormente se coloca un trozo de papel fieltro sobre el bastidor procurando mantener las mismas medidas del fieltro con el molde y se coloca el marco de madera por encima del fieltro a fin de hacer presión sobre este.

Una vez armado el molde completo se procede a sumergirlo dentro de la pulpa por algunos segundos para después retirarlo y dejar drenar por gravedad hasta que no se aprecie el exceso de agua (ver figura IV-22). En este punto se debe revisar si la hoja se formó correctamente, es decir, que no se aprecien huecos por falta de pulpa, grietas o un espesor muy delgado, de lo contrario la hoja formada debe ser destruida y devuelta a la solución para volver a formarla. Este proceso se continuó realizando hasta que la pulpa se terminó.



Figura IV-22 Formado de la hoja (capturada por el autor)

Cada vez que una hoja se considere apta para continuar en el proceso, se introduce en una *prensa* mecánica que consta de dos tablas de triplay unidas a una base metálica y estos a su vez a un tornillo largo en cada una de sus esquinas (ver figura IV-23). Este proceso dura aproximadamente de 15 a 20 días durante los cuales es necesario cada dos días cambiar el fieltro húmedo por fieltro seco. La acción de prensar las hojas (ver figura IV-24) de papel permite retirar la mayor cantidad de agua posible antes de pasar a la segunda etapa de secado.

- Nota: Es importante dejar las hojas bajo presión dentro de la prensa para minimizar el arriscamiento de estas, debido a la contracción de las fibras.



Figura IV-23 Hojas bien formadas y listas para ser prensadas (capturada por el autor)



Figura IV-24 Prensado de la hoja (capturada por el autor)

La segunda etapa del secado se realiza con ayuda de la energía solar. Se debe exponer las hojas a la radiación solar por breves lapsos de entre uno y dos minutos para que la humedad que se encuentra en los capilares del papel se evapore por la acción del sol. A causa de esta deshidratación capilar que se induce, aparece un fenómeno de deshinchazón de las fibras, lo que produce que en las hojas aparezcan arrugas, pliegues y ondulaciones.

- Nota: Con la finalidad de darle una mejor apariencia al papel, este fue sometido a un tratamiento con vapor, haciendo uso de una plancha de vapor, la cual especifica una presión de 5 bar



Figura IV-25 Secado al sol. (capturada por el autor)

Una vez que las hojas se terminaron de secar, se emparejaron los márgenes de cada una de ellas y se engargolaron con la finalidad de darles una mejor presentación (ver figura IV-26).



Figura IV-26 Hojas engargoladas para su presentación final. (capturada por el autor)

Para finalizar, los licores utilizados en la digestión del bagazo fueron primeramente mezclados con el hipoclorito que se utilizó en el blanqueo de pulpa y posteriormente la mezcla fue neutralizada haciendo uso de ácido clorhídrico 1 M hasta un pH con valor entre 7 y 8, dejando un tiempo de reacción de cinco minutos antes de cada lectura de pH. Una vez que se terminó de neutralizar tanto los licores como el hipoclorito de sodio fueron desechados.

En el siguiente diagrama de bloques se observa el proceso correspondiente a la formación de las hojas y al secado de estas.

Diagrama de bloques para el proceso de formación y secado de las hojas.



CAPÍTULO VI PRUEBAS REALIZADAS A LAS HOJAS DE PAPEL

Las características del papel pueden clasificarse como físicas, ópticas, químicas, eléctricas y microscópicas.

Las siguientes pruebas se realizaron con base en las normas mexicanas NMX correspondientes a la industria de la celulosa y papel. Al no contar con los equipos y/o reactivos que la norma establece, los resultados que se obtienen son únicamente cualitativos.

La importancia de realizar estas pruebas a las hojas de papel radica en que con ello se establece un punto de partida para optimizar el proceso y así obtener hojas de papel de mayor calidad que en un futuro puedan competir con las que actualmente se encuentran en el mercado.

La tabla 5.1 define las características no medibles que presentan las hojas de papel, haciendo mención que dichas características son meramente subjetivas.

Descripción	Presenta	
	Si	No
Suciedad	x	
Pliegues	x	
Orificios	x	
Desprendimiento de fibras		X
Marcas oleosas		x
Otras observaciones: Se percibe coloración amarillenta.		

5.1. Propiedades generales

5.1.1. Humedad

La norma mexicana NMX-N-016-SCFI-2011 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS PAPELES Y CARTONES POR SECADO EN ESTUFA (ver anexo 1) define a la humedad como el valor porcentual (peso/peso) de agua evaporable que se contiene en el papel y cuya magnitud es expresada en porcentaje (%).

Para realizar esta prueba, se utilizó una termobalanza (ver figura V-1), realizando un total de 5 corridas de 10 min cada una a $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ y registrando los datos obtenidos en la tabla 5.2



Figura VI-1 Prueba de humedad (capturada por el autor)

Tabla 5.2 Prueba de humedad						
Corrida	Peso inicial	Peso final	% Humedad	% Sólidos	Temperatura	Tiempo
1	0.532 g	0.487 g	8.46	91.54	100 °C	10 min
2	0.556 g	0.506 g	8.99	91.01	101 °C	10 min
3	0.530 g	0.490 g	7.55	92.45	101 °C	10 min
4	0.544 g	0.499 g	8.27	91.73	100 °C	10 min
5	0.537 g	0.497 g	7.45	92.55	100 °C	10 min

5.1.2. Espesor

La norma mexicana NMX-N-009-SCFI-2011 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL – ESPESOR Y PESO ESPECÍFICO DE PAPELES Y CARTONCILLOS. - MÉTODO DE PRUEBA (ver anexo 1) define al espesor o calibre como el valor de la distancia perpendicular entre dos superficies paralelas y planas, medidas en condiciones específicas y que se mide con un micrómetro que permita estimar mediciones del espesor de hasta 0.002 5 mm. Su magnitud es expresada en milímetros (mm) o en puntos (milésimas de pulgada) de una sola hoja de papel.

La importancia del espesor radica en que casi todas las propiedades físicas, ópticas y eléctricas del papel se ven afectadas. Un calibre uniforme es muy importante por ejemplo en el papel para imprimir. La presión que se aplica en la impresión se afecta por el espesor del papel y en caso de que el espesor varíe, la presión también lo hará. En otro ejemplo si el papel es utilizado para tarjetas de archivo, no se debe exceder el espesor requerido para evitar que se ocupe un espacio valioso en los gabinetes de los archiveros.

Para realizar esta prueba se tomaron cinco hojas de papel y se realizó una medición en tres puntos diferentes de la misma con ayuda del micrómetro (ver figura V-2). Posteriormente, se calculó un promedio de las tres mediciones y se repitió el mismo procedimiento para las muestras restantes y se registraron los datos en la tabla 5.3

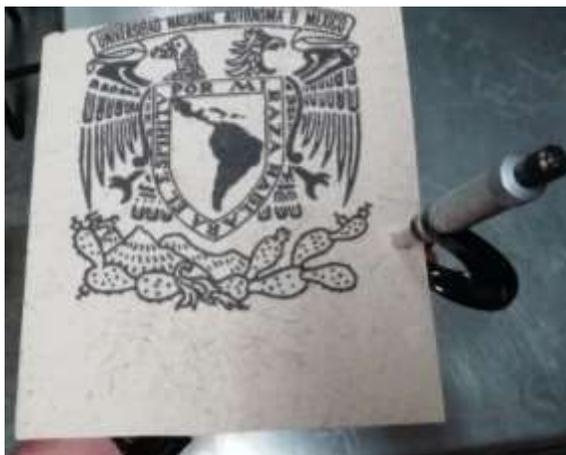


Figura VI-2 Prueba de espesor (capturada por el autor)

Muestra	Espesor
1	0.0512 mm
2	0.0504 mm
3	0.0517 mm
4	0.0503 mm
5	0.0510 mm
Promedio	0.05092 mm

5.1.3. Escritura

La escritura es una prueba que se le realizó a las hojas que se manufacturaron en este trabajo de tesis, en la figura V-3 se puede apreciar que es posible realizar trazos, con diversos tipos de materiales:

La primera línea corresponde a tinta gel de color negro, en la segunda línea se escribió con lápiz de grafito, la tercera con un marcador base agua de color rojo, en la cuarta con tinta de color azul y en la quinta con un color de madera verde.

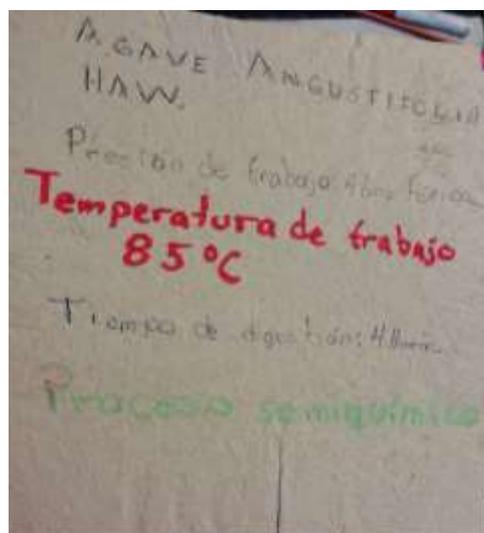


Figura VI-3 Prueba de escritura (capturada por el autor)

5.1.4. Borrado

En cuanto al borrado primeramente se delimitó una zona en la cual se trazaron un par de líneas y posteriormente se procedió a borrar con una goma de migajón como lo muestra la figura V-4. Después se repitió el proceso 10 veces más en la misma zona que se había delimitado para observar si la fibra se desprendía, si se formaba algún hoyo en la hoja o si definitivamente el grafito no se removía de la superficie de la hoja.

Al realizar la misma prueba con una goma de otro material parecido al caucho, que, al ser más fuerte supondría un maltrato mayor hacia la superficie de la hoja que el ejercido por la goma de migajón, se observó que la superficie de la hoja de papel tampoco presentó desprendimiento de fibras, desgarros o formación de huecos.

De las pruebas anteriores, tampoco se registró la formación de manchas características por escribir y borrar en repetidas ocasiones.



Figura VI-4 Prueba de borrado (capturada por el autor)

5.1.5. Impresión

La prueba de impresión se realizó con una impresora casera HP modelo Deskjet 3050 que trabaja con un sistema de inyección de tinta. La primera prueba corresponde a la figura V-5, en donde se observa que, debido a la mal formación de la hoja, la imagen no fue completada. En la figura V-6, se nota la mejoría en la hoja y por lo tanto de la calidad de impresión con una imagen completa y nítida.



Figura VI-5 Prueba uno de impresión (capturada por el autor)



Figura VI-6 Prueba dos de impresión (capturada por el autor).

5.2. Propiedades químicas

5.2.1. Encolado

Según la norma mexicana NMX-N-SCFI-2006 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL – DETERMINACIÓN DEL ENCOLADO DEL PAPEL POR SU RESISTENCIA A LA TINTA (MÉTODO TIPO HÉRCULES) (ver anexo 1). El encolado se puede definir como la resistencia que el papel ofrece a la penetración de los líquidos al interior y a través de la hoja. Esto se logra mediante la aplicación durante el proceso de ciertos aditivos, lo cuales se pueden aplicar internamente o sobre la superficie de la hoja ya formada.

Esta norma nos indica que es aplicable a la mayoría de los papeles o cartulinas blanqueados, sin blanquear y de colores, que estén encolados en la superficie, internamente o con ambos procedimientos.

La prueba se realizó con dos métodos distintos y registrando los datos en la tabla 5.4

1. Método de la gota: Se tomaron tres muestras de la hoja de papel y se vertió una gota de agua sobre cada una de ellas. En cuanto la gota tocó la superficie de la hoja, se activó el cronómetro y se registró el tiempo que tardó el agua en atravesar la muestra (Ver figura V-7)



Figura VI-7 Prueba de encolado. Método de la gota (capturada por el autor)

2. Método del vaso: Se tomaron tres muestras de la hoja de papel y se depositaron dentro de un vaso para precipitados que contenía 150 mL de agua, inmediatamente se activó el cronómetro y se registró el tiempo que tardó el líquido en atravesar la muestra por completo (Ver figura V-8)



Figura VI-8 Prueba de encolado. Método del vaso (capturada por el autor)

Tabla 5.4 Prueba de encolado.			
Método de la gota		Método del vaso	
Muestra	Tiempo	Muestra	Tiempo
1	2 s	1	2 s
2	3 s	2	2 s
3	3 s	3	3 s
Promedio	2.66 s	Promedio	2.33 s

5.2.2. pH

El pH determina la permanencia del papel y es muy importante sobre todo para aquellos en los que se desea conservar registros permanentes como el papel de escritura o el papel de impresión. Su determinación se efectúa mediante la medición de iones ácidos o básicos existentes en el extracto y se pueden derivar de:

-
-
- A) Alumbre.
 - B) Residuos del blanqueo.
 - C) Absorción de gases ácidos de la atmósfera.
 - D) Presencia de ácidos orgánicos presentes en la pulpa.
 - E) Agentes encolantes.
 - F) Materiales de recubrimiento.

La norma NMX-N-011-1965 DETERMINACIÓN DEL pH EN PAPEL (ver anexo 1) menciona que existen dos métodos para la determinación del mismo, en este caso se hace uso de una extracción en frío, tomando cinco muestras de diferentes hojas, cada una disuelta por separado en 100 mL de agua destilada a temperatura ambiente. Cada muestra se agita vigorosamente durante dos minutos y se deja reposar por una hora. Transcurrido el tiempo de reposo se toma la lectura de pH presente en la fase acuosa (ver figura V-9) y se registraron los datos en la tabla 5.5

Muestra	pH
1	8.21
2	8.17
3	8.15
4	8.15
5	8.18



Figura VI-9 Prueba de pH (capturada por el autor)

5.2.3. Cenizas

Las cenizas representan la cantidad de material inorgánico presentes en las hojas de papel. Su composición depende de la presencia o ausencia y la combinación de los siguientes materiales:

- A) Residuos Químicos usados en la manufactura.
- B) Material metálico de tuberías y equipo.
- C) Material mineral presente en la pulpa.
- D) Cargas, aditivos, pigmentos, agentes encolantes, revestimientos u otro tipo de materiales agregados.
- E) Materia mineral presente en el agua.
- F) Alumbre utilizado en la preparación del agente encolante.
- G) Papel de desperdicio, en caso de que este se use para la fabricación de papel.

La forma en que se llevó a cabo esta prueba fue con cinco muestras de diferentes hojas de papel, cada una de ellas se pesó en una balanza analítica, tratando de mantener los valores lo más parecidos posible.

Se encendió la mufla y se esperó a que se calentara hasta una temperatura de 900 °C para poder introducir la primera muestra en un crisol y dejarla calcinar durante 40 minutos. (ver figura V-10 y V-11) Los resultados obtenidos se registraron en la tabla 5.6



Figura VI-10 Prueba de cenizas. Calentamiento de la mufla (capturada por el autor)



Figura VI-11 Prueba de cenizas. Cenizas obtenidas (capturada por el autor)

Tabla 5.6 Prueba de Cenizas					
No. Crisol	Peso inicial	Peso final	% Cenizas	Tiempo	Temperatura
1	0.1125 g	0.0092 g	8.178	40 min	900 °C
2	0.1126 g	0.0095 g	8.437	40 min	900 °C
3	0.1209 g	0.0114 g	9.429	40 min	900 °C
4	0.1135 g	0.0096 g	8.458	40 min	900 °C
5	0.1103 g	0.0086 g	7.797	40 min	900 °C
		Promedio	8.4598		

CAPÍTULO VII ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características morfológicas y físicas del bagazo de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) permitieron obtener hojas de papel mediante un proceso semiquímico a la sosa con resultados satisfactorios. De acuerdo con las condiciones establecidas (concentración del licor, temperatura de digestión y tiempo de residencia) en este trabajo de tesis para llevar a cabo la manufactura de papel, fue posible obtener un total de 35 hojas, de las cuales 25 se presentan en un engargolado, 4 fueron sometidas a pruebas destructivas (ver capítulo V) y las 5 hojas restantes se repartieron como obsequio a diferentes personas.

Las propiedades generales y químicas del papel que se realizaron en este trabajo de tesis demuestran que las hojas obtenidas no están muy alejadas de los márgenes comerciales que la literatura establece (ver anexo 2). Algunas características que presentan dichas hojas son la posibilidad realizar hasta 262 dobleces en la misma zona sin que esta sufra algún tipo de rasgado o desprendimiento de la fibra, de la misma forma es factible realizar una impresión o plasmar texto en su superficie lo cual refiere una buena absorción y retención de la tinta. En cuanto al borrado, los resultados fueron satisfactorios porque no existió desprendimiento ni rotura de las fibras en la superficie de las hojas, de la misma manera no quedaron marcas del grafito ni manchas características de borrar la misma zona en repetidas ocasiones. También es posible apreciar fibras largas que debido a la falta de un sistema de refinado con mayor eficiencia imposibilitó que el tamaño de estas fuese más uniforme y con ello tanto la impregnación de los licores con las fibrillas en la digestión como la reacción de cloro con la pulpa en el blanqueo redujera la eficiencia.

A pesar de que no se tuvo un control adecuado en la formación de las hojas, los resultados de espesor mostrados en la tabla 5.3 indican que se mantuvo uniformidad en el calibre de estas. En la misma tabla se pueden observar los valores que se obtuvieron al realizar la prueba de espesor utilizando un micrómetro y que al compararlos con el cuadro 3 del anexo muestran que se podría clasificar dentro de los espesores de papel Glassine.

En el caso de la humedad se registraron porcentajes (ver tabla 5.2) de entre 7.45 a 8.99, lo cual lo coloca ligeramente por encima de los márgenes de humedad permisible que la

literatura establece tanto para papel como para cartón (ver cuadro 2, anexo 2) sin embargo cuando dicha prueba fue realizada, pudo verse afectada debido a que el ambiente contenía un alto grado de humedad en el aire y posiblemente las fibras de papel la absorbieron. Otro factor que pudo afectar a ese exceso de humedad en las hojas es la manera en que se sometieron al secado, ya que este procedimiento fue hecho de una forma rústica, prensando las hojas y posteriormente dejándolas a la radiación solar.

En el encolado, que en este caso fue interno, los resultados estuvieron muy alejados de las pruebas comerciales ya que como lo muestra la tabla 5.4, el tiempo que tardó el agua en penetrar y traspasar las fibras de papel fueron en promedio de 2.66 y 2.33 segundos en la prueba respectiva, mientras que en una hoja de papel multiusos comercial, los datos arrojados fueron en promedio de 20.06 y 20.22 segundos por lo que sería recomendable utilizar un encolado externo o usar otros agentes encolantes y por consecuencia minimizar los espacios entre fibras, logrando una mayor resistencia del papel a ser penetrado por la humedad.

Las cenizas que se obtuvieron al realizar las pruebas a los 5 especímenes se muestran en la tabla 5.6 en el que se obtuvo un promedio de porcentaje de cenizas del 8.46% lo cual según el cuadro 4 del anexo 2, lo colocaría dentro del margen de los papeles para libros impresos en Offset. Dichas cenizas tuvieron un aspecto esponjoso y con una coloración blanca con tintes amarillentos, lo cual refiere a que dentro de las hojas de papel existía la presencia de material orgánico y algunos colorantes propios de la fibra que no pudieron ser retirados por completo en la etapa de blanqueo.

Los valores que se registraron en la tabla 5.5 demuestra que las hojas tienen un pH ligeramente alcalino lo cual se puede deber al Ca_2CO_3 utilizado como carga (ver capítulo V), así mismo al detectar que el pH de las hojas de papel tienden a la alcalinidad, se optó por medir el pH del agua utilizada en el laboratorio experimental multidisciplinario (LEM) nave 1000, registrando un valor de $\text{pH} = 7.76$ lo que sugiere que ese valor pudo alcalinizar aún más a las hojas de papel terminadas.

CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados en el trabajo de tesis y los resultados obtenidos tanto de las hojas de papel como de las pruebas realizadas a las mismas y que se registraron en el capítulo IV y V respectivamente, se puede llegar a la conclusión de que es posible obtener a nivel laboratorio hojas de papel a partir de la fibra del bagazo de agave espadín (*Angustifolia Haw.*) recolectado de los municipios de Malinalco y Ocuilan del Estado de México, haciendo uso de un método semiquímico a la sosa y al mismo tiempo darle un uso más productivo a este desecho de la industria mezcalera.

Las pruebas de propiedades generales realizadas a las hojas de papel (ver capítulo V) permiten tener un punto de partida para realizar un nuevo y futuro estudio en donde se pueda mejorar y optimizar el proceso de obtención de la pulpa celulósica y también en la formación de las hojas de papel, en la cual se pueda tener un mayor control de propiedades como el calibre o el porcentaje de humedad de la hoja formada y así mejorar la calidad del papel que se obtenga.

Al realizar las pruebas químicas a las hojas de papel (ver capítulo V) se comprueba que es necesario utilizar otro tipo de agente encolante o un encolado externo, debido a que la humedad penetra muy fácil en las fibras y esto puede provocar su rompimiento. El pH del papel registrado al ser alcalino y con valores de entre 8.15 a 8.21 se sitúa por encima de los márgenes permitidos que se establecen en la literatura y que se muestran en el anexo 2. Sin embargo, como se menciona en el capítulo anterior, este valor podría deberse a las cargas utilizadas para la manufactura del papel y al pH alcalino que se registró en el agua utilizada para la experimentación.

El papel obtenido es apto para uso de escritura e impresión, teniendo potencial para aplicarlo también en manufactura de papel de embalaje siempre y cuando a este último se le mejore la propiedad de encolado tal y como se discutió en el capítulo VI, en el cual se efectuó un análisis de los resultados que comparan los valores recopilados de las pruebas realizadas al papel de agave espadín y los márgenes permisibles de algunas propiedades que se extrajeron de la literatura (ver anexo 2).

Gracias a este trabajo de tesis es factible pensar en un futuro escalamiento del proyecto para una planta piloto en donde sea posible llevar a cabo un estudio de mercado, un estudio de balance económico y así mismo un balance de materia y energía con la finalidad de poder ofrecer la pulpa celulósica de agave espadín como un potencial sustituto de las pulpas maderables que hoy en día se encuentran en el mercado y así minimizar el impacto ambiental causado por la deforestación excesiva que genera la demanda de este material tan cotidiano pero tan necesario en la vida cotidiana.

REFERENCIAS

- [1.] Aguilar, S. Ramírez, J. & Malagón, O. (2007). *Extracción de fibras no leñosas: Cabuya (Furcraea andina Trel.) y banano (Musa paradisiaca L.) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa de papel*. San Cayetano. Ecuador. Revista Iberoamericana de Ecuador.
- [2.] Cámara del papel (agosto 2018). Obtenido de Cámara del Papel: <http://camaradelpapel.mx/historia-del-papel/>
- [3.] Caneda, J. (2003). *Tecnología de Fabricación de Papel*. USC
- [4.] Casey, J. P. (1990). *Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química* Vol. 1. México: Limusa.
- [5.] Casey, J. P. (1990). *Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química* Vol. 2. México: Limusa.
- [6.] Casey, J. P. (1990). *Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química* Vol. 3. México: Limusa.
- [7.] El informador (2009, noviembre 09). *La industria del papel en México agoniza por falta de bosques*. El informador Sección finanzas. Recuperado el 18 de marzo de 2019.
- [8.] Forbes (2014, julio 24). *El futuro del papel está en las piedras*. [Versión electrónica] recuperado el 20 de marzo de 2019.
- [9.] García, J. A. (2007) *Fibras Papeleras* (1ra ed.). Barcelona: Edicions UPC.
- [10.] García, M. A. (2007). *Los Agaves de México*. Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México
- [11.] García-Mendoza, A. y Galván, R. (1995). *Riqueza de las familias Agavaceae y Nolinaceae en México*. Boletín de la Sociedad Botánica de México.
- [12.] Hunter, D. (1947) *Papermaking: The History and Technique of an Ancient Craft*. New York. Dover publication.
- [13.] Ledezma, A. (2014). *Propuesta de instalación de una planta productora de papel a partir del lirio acuático*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [14.] Libby, E. (1967). *Ciencia y Tecnología Sobre Pulpa y Papel*. México: Continental.
- [15.] Mezcológica (enero 2019). Obtenido de mezcológica: <http://mezcológica.mx/agave-angustifolia/>
- [16.] Montes, R. (2014). *Análisis de las condiciones geográficas y de producción del destilado de agave de Zumpahuacán, Estado de México para la obtención de la denominación de origen de mezcal*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [17.] Montesinos, H. (2010). *Anteproyecto para la elaboración de papel Kraft utilizado en la fabricación de sacos de cemento a partir de fibras secundarias*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [18.] NMX-N-011-1965 DETERMINACIÓN DEL PH EN PAPEL
- [19.] NMX-N-016-SCFI-2011 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS PAPELES Y CARTONES POR SECADO EN ESTUFA
- [20.] NMX-N-024-1968 NOMENCLATURA, CLASIFICACION Y DEFINICIONES DE LAS PULPAS CELULÓSICAS PARA PAPEL Y CARTON
- [21.] NMX-N-041-SCFI-2007 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DE ENCOLADO EN PAPEL, CARTONCILLO Y CARTÓN CORRUGADO (PRUEBA COBB)
- [22.] NMXN-N-009-SCFI-2011 INDRUSTIAS DE CELULOSA Y PAPEL – ESPESOR Y PESO ESPECÍFICO DE PAPELES Y CARTONCILLOS - MÉTODO DE PRUEBA

-
-
- [23.] NMX-N-SCFI-2006 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL – DETERMINACIÓN DEL ENCOLADO DEL PAPEL POR SU RESISTENCIA A LA TINTA (MÉTODO TIPO HÉRCULES)
- [24.] Quiero mezcal (enero 2019). Obtenido de Quiero mezcal: <https://www.quieromezcal.com/agave/espadin/>
- [25.] Romero, C. (2014). *Formación de hojas de papel con pulpa celulósica no maderable obtenida a partir de fibra seca de nopal (Opuntia Streptacantha)*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [26.] Rosas, Y. (2016). *Extracción de compuestos lignocelulósicos de bagazo de Agave angustifolia Haw obtenidos por organosolv asistido con microondas*. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- [27.] Slone, V. (2018). *Extracción de fibra de pinzote de plátano con uso potencial textil y diseño*. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

ANEXO 1 NORMAS MEXICANAS NMX.

NMX-N-016-SCFI-2011 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS PAPELES Y CARTONES POR SECADO EN ESTUFA.

Esta norma mexicana establece las especificaciones, procedimiento y precisión del método de prueba para determinar la humedad en papeles y cartones por secado en estufa. Se puede aplicar a hojas y bobinas de papel que no contengan materiales evaporables a temperaturas inferiores a 107 °C o degradables a temperaturas inferiores a 103 °C

El aparato utilizado es una estufa con ventilación forzada de aire y que permita mantener constante la temperatura a 105 ± 2 °C. Así mismo es necesaria una balanza cuya sensibilidad sea como mínimo el 0.05 % del peso original de la muestra y por último recipientes para pesadas que normalmente en muestras pequeñas suelen ser de vidrio con 65 mm de diámetro y 45 mm de altura.

Para estimar la humedad se utiliza la ecuación

$$H = \frac{G - G_s}{G}$$

Donde:

H= humedad referida al peso inicial del papel y se expresa en %, G= peso inicial de la muestra expresado en gramos, G_s= peso final de la muestra expresado en gramos.

NMX-N-009-SCFI-2011 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN ESPESOR Y PESO ESPECÍFICO DE PAPELES Y CARTONCILLOS- MÉTODO DE PRUEBA.

Esta norma mexicana establece las especificaciones, procedimiento y precisión del método de prueba para determinar el espesor y el peso específico de papeles y cartoncillos, se aplica a hojas de papel liso de cualquier espesor.

El aparato utilizado es un calibrador de espesores de operación manual que tiene dos caras paralelas, una de ellas (la más pequeña) es móvil y circular. Ambas caras deben tener un eje común perpendicular a las mismas. Las distancias entre las graduaciones de la carátula deben permitir mediciones de espesor de hasta 0,0025 mm.

NMX-N-SCFI-2006 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DEL ENCOLADO DE PAPEL POR SU RESISTENCIA A LA TINTA (MÉTODO TIPO HÉRCULES).

La resistencia a la tinta por el método de Hércules se clasifica como una prueba de medición directa del grado de penetración. Este método es especialmente apropiado para usarse como control del encolado en las plantas para detectar los cambios en el grado de encolado del papel. Esta norma mexicana establece el método de prueba para medir la resistencia a la penetración de los líquidos acuosos, empleando una solución acuosa de colorante oscuro, como penetrante, para permitir la detección óptica del líquido a medida que avanza a través de la hoja.

Es aplicable a la mayoría de los papeles o cartulinas blanqueados, sin blanquear y de colores que estén encolados en la superficie, internamente o con ambos procedimientos. No aplica en papeles traslúcidos, papeles de colores que no tengan contraste con la tinta verde de la prueba o a papeles que contengan en su estructura una barrera eficaz contra el agua.

El aparato utilizado es un fotómetro de un solo propósito que satisface una iluminación de la superficie inferior del espécimen de papel a 45°, usando dos lámparas incandescentes de halógeno alimentadas por una fuente de voltaje constante, equidistantes. Una fotocelda de silicio con visión a 90° del espécimen y una segunda fotocelda de silicio con visión directa de los filamentos de la lámpara. Una restricción eficaz de la transferencia de calor de las lámparas al espécimen por medio de filtros infrarrojos y ventiladores. Un cronómetro integrado con arranque manual al principio de la prueba y paro automático en el punto final.

NMX-N-011-1965 DETERMINACIÓN DEL pH EN PAPEL.

Esta norma establece el método oficial de prueba para la determinación del valor de pH en el extracto acuoso, no filtrado, del papel. Aplica a los papeles usuales y establece dos procedimientos.

La extracción en frío que se lleva a cabo a temperatura de entre 25 y 30 °C y en la que los valores referidos se deben únicamente al pH del papel. Por otro lado, la extracción en caliente que se desarrolla a temperaturas entre 95 y 100 °C y en donde los valores obtenidos se ven influenciados por la hidrólisis del sulfato de aluminio a mayor temperatura

El aparato utilizado es un potenciómetro con electrodos de vidrio y celda de calomel, usada como referencia, además de material común de laboratorio. Al realizar esta prueba es necesario especificar si la extracción se llevó a cabo en frío o en caliente.

ANEXO 2 MÁRGENES PERMISIBLES DE ALGUNOS PAPELES Y CARTONES COMERCIALES.

Cuadro 1. pH de algunos papeles comerciales (tomado de Romero, 2014)

Tipo de papel	pH
Metálico	6.96
Lustre	7.03
Micro	6.87
Bond	7.14
América	7.48
Office	7.23
Estranza	7.03
China	7.16
Crepé	7.23
Terciopelo	7.79
Cascarón	7.35

Cuadro 2. Contenido de humedad permisible para cartón y papel (obtenido de Casey, 1990)

Tipo	% de humedad
Papel	5 a 7
Cartón para cajas plegables	6 a 7

Cuadro 3. Valores aproximados de espesor de algunos papeles comerciales (tomados de Casey,1990)

Tipo de papel	Espesor (mm)
Papel Glassine	0.025 a 0.070
Papel bond de escritura	0.065 a 0.150
Sacos de cemento	0.230 a 0.635

Cuadro 4. Contenido de cenizas de algunos papeles comerciales (obtenido de Casey,1990)

Tipo	% Cenizas
Papeles sin rellenar	< 2 ⁶
Papeles para imprimir cartas	15 a 20
Papeles para libro impresos en Offset	8 a 15
Papeles recubiertos con pigmentos	20 a 45
Papeles bond y de escritura	2 a 6 ⁷

⁶ En raros casos se puede obtener porcentajes de hasta el 5 % de cenizas.

⁷ El papel bond opaco recibe una especificación del 6 % como contenido mínimo de cenizas.