



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Propuesta para la obtención de pulpa celulósica a partir de la fibra de tallo de maíz (*zea mayze*) para la elaboración de papel**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**Ingeniera Química**

**P R E S E N T A:**

Citlalli Celeste Cruz Cortés



**UNAM  
CUAUTITLÁN**

**ASESOR:**

Q. Celestino Silva Escalona

Cuautilán Izcalli, Estado de México 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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

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

Propuesta para la obtención de pulpa celulósica a partir de la fibra de tallo de maíz (zea mayze) para la elaboración de papel.

Que presenta la pasante: Citlalli Celeste Cruz Cortés

Con número de cuenta: 306020876 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 21 de Junio de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Q. Celestino Silva Escalona	
<b>VOCAL</b>	I.A. Ana María Sixto Berrocal	
<b>SECRETARIO</b>	I.Q. Elvia Mayen Santos	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Dulce María Oliver Hernández	
<b>2do. SUPLENTE</b>	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	

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

LMCF/cga\*



*“El maíz no es sólo un grano,  
un alimento y un cultivo,  
es una forma de ser y de tener identidad”*

(Fragmento documental SUNÚ)



## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, la vida, al Universo

Con mucho cariño dedico y agradezco este logro:

A mis padres, por impulsar cada uno de mis sueños y apoyarme incondicionalmente en todos los retos que la vida me ha puesto.

A mi hija Avril y mi hijo Emiliano, les agradezco me hayan elegido como su madre, ya que se convirtieron en mis maestros de vida, sé que mis logros les darán frutos.

A mis hermanas Sandra y Cristi, siempre han sido un apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por ellas también logre concluir esta etapa.

A mis hermanos Eder y Jair, siempre al pendiente de la diversión de mi hija mientras yo estudiaba.

A mis amigos y familiares, siempre creyeron en mí, ahora concluyo una etapa de mi vida que estoy segura, será una motivación para continuar sus sueños a pesar de los retos que se presentan en la vida.

A mi Asesor Celestino, le tengo un gran cariño por que compartió conmigo un poco de su enorme conocimiento, fue paciente y comprensivo a lo largo de la elaboración de este trabajo.

A todos y cada uno de los Profesores de la FESC, por su pasión por enseñar a las nuevas generaciones, cada uno me dejo una enseñanza que nunca olvidare, es un placer y un honor para mí el haber recibido la educación en esta máxima casa de estudios.



## ÍNDICE

RESÚMEN.....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
OBJETIVOS .....	10
1.0 HISTORIA DEL PAPEL .....	11
2.0 COMPOSICIÓN Y ELABORACIÓN DEL PAPEL.....	13
3.0 ASPECTOS GENERALES DE LA PLANTA DE MAÍZ .....	17
3.1 Características de la planta de maíz .....	17
3.3 Origen y distribución.....	22
3.4 Morfología del tallo de maíz.....	27
3.5 Lignocelulosa en el tallo de maíz.....	29
4.0 SITUACIÓN INDUSTRIAL PAPELERA EN EL MUNDO.....	31
4.1 La producción y consumo de papel a nivel mundial.....	31
4.2 Importaciones y exportaciones de productos forestales.....	32
5.0 SITUACIÓN INDUSTRIAL PAPELERA EN MÉXICO .....	37
5.1 Participación del sector celulósico-papelero en el Producto Interno Bruto Nacional .....	37
5.2 Productos de papel .....	38
5.3 Alternativas para fabricación de papel sin daño al medio ambiente.....	40
6.0 FIBRAS VEGETALES NO MADERABLES.....	43
6.1 ¿Qué son las fibras vegetales no maderables? .....	43



6.2 Ventajas e inconvenientes del uso de fibras no maderables en la industria papelera .....	45
6.3 Propiedades físicas y químicas de fibras vegetales no maderables a emplearse en la elaboración de papel .....	47
7.0 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PULPA PARA PAPEL .....	49
7.1 Procesos de fabricación de pulpas químicas .....	49
7.1.1 El proceso Kraft .....	50
7.1.2 El proceso a la sosa .....	51
7.1.3 Procesos ácidos .....	51
7.2 Procesos de fabricación de pulpas mecánicas o de alto rendimiento .....	51
7.2.1 Procesos mecánicos sin pre tratamiento químico .....	52
7.2.2 Procesos mecánicos con pre tratamiento químico .....	52
7.2.3 El proceso a la sosa en frío (CCS, cold caustic soda) .....	55
7.2.4 Procesos al sulfito neutro .....	56
7.3 Propuesta para la obtención de pulpa celulósica a partir del tallo de maíz .....	59
7.4 Diagrama del proceso para obtención de papel de tallo de maíz .....	59
7.5 Obtención de pulpa a partir de tallo de maíz .....	61
7.5.1 Recolección del tallo de maíz .....	61
7.5.2 Trituración .....	62
7.5.3 Digestión .....	63
7.5.4 Desfibrado .....	64
7.5.5 Depuración y limpieza .....	65



7.5.6 Blanqueo .....	66
7.6 Formación de las hojas a partir de pulpa celulósica de tallo de maíz .....	68
7.6.1 Mezclado: adición de cargas y aditivos .....	71
7.6.2 Formación de las hojas.....	72
7.6.3 Prensado .....	74
7.6.4 Secado .....	75
CONCLUSIONES .....	77
BIBLIOGRAFÍA .....	78
ANEXO I .....	84
Panorama agroalimentario maíz 2016.....	84
ANEXO II.....	85
Términos botánicos manejados en la tesis .....	85
ANEXOIII.....	86
Nomenclatura .....	86





## **PROPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA CELULÓSICA A PARTIR DE LA FIBRA DE TALLO DE MAÍZ (*Zea Mayze*) PARA LA ELABORACIÓN DE PAPEL**

### **RESÚMEN**

El presente trabajo de tesis, funge como aporte documental a la investigación de fibras vegetales no maderables para el empleo de éstas en producción de pulpa para papel, tomando como base los residuos agrícolas de la industria del maíz en México. La propuesta busca tener soluciones mediante alternativas sostenibles en la obtención de papel, evitando con ello la utilización de fibras maderables provenientes de árboles, además de imprimirle un valor agregado a las fibras vegetales.

La intención es dar a conocer a las personas el concepto del papel, haciendo un recorrido por la historia mundial de la evolución de éste y su importancia en las civilizaciones, así como su situación actual en el mundo y en México. Se incluye un panorama de la utilidad de fibras vegetales no maderables para estos fines.

Posteriormente se describen los aspectos técnicos que involucran la producción del papel como la composición principal de la materia prima, tallo de maíz, centraremos la atención en la normalización del proceso semiquímico hidróxido de sodio en frío utilizando la fibra de tallo de maíz, logrando una mejor resistencia mecánica del producto con el correcto control de las variables que se involucran en éste.



## INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo del papel en el mundo y las previsiones de crecimiento que se hacen de él, se sustentan en modelos económicos insostenibles, enormemente derrochadores y contrarios al principio de precaución con el Medio Ambiente. Esta es la premisa más peligrosa: el crecimiento de la demanda de papel es inevitable. Los analistas de la industria forestal consideran que el consumo de papel es un “indicador de desarrollo”, cuando en realidad es un indicador de despilfarro de los recursos naturales. Además, numerosos indicadores económicos y sociales señalan la pérdida de calidad de vida en zonas y países del planeta donde crece la demanda de papel. Las naciones industrializadas, con el 20 % de la población mundial, consumen el 87 % del papel para escribir e imprimir. Consumen pero, sobre todo, derrochan recursos, ya que entre el 30 % y el 40 % de los residuos sólidos urbanos generados en América son papel y cartón. Usamos demasiado papel y, además, lo tiramos a la basura. [19]

Existe un elevado crecimiento respecto a la utilización de papel, que ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes adicionales de fibras que puedan satisfacer la necesidad de mayores cantidades de papel. La celulosa también está presente en las especies vegetales que forman parte del consumo humano y, por lo tanto, los residuos orgánicos podrían convertirse en materia prima para la fabricación de papel.

El cultivo del maíz produce una gran cantidad de biomasa, de la cual se cosecha apenas cerca del 50 % en forma de grano. El resto, corresponde a diversas estructuras de la planta tales como tallo, hoja, limbos y mazorca entre otros. [37]

La producción de biomasa residual que genera un cultivo de maíz de grano (tallo, hojas, limbos y mazorcas), fluctúa entre 20 a 35 toneladas por hectárea. Por lo anterior y debido al gran



interés actual por la protección del medio ambiente la mayoría de las industrias hoy en día se preocupa por procesos, instrumentos y materias primas ecológicas que permitan ser más amigables con el medio ambiente. Teniendo como base la fácil consecución de la materia prima alterna, tallo de maíz, se propone la obtención de pulpa de papel a partir de fibras vegetales para determinar si la propuesta de esta fibra es óptima para la elaboración de papel a partir de la pulpa obtenida de la fibra del tallo de maíz.



## OBJETIVOS

### *General*

Proponer un proceso de obtención de pulpa a partir del tallo de maíz (*Zea Mayze*) como una alternativa rentable y sostenible para el medio ambiente en la elaboración de papel, considerando que esta fuente natural es un desperdicio en la cosecha del maíz.

### *Específico*

Proponer un proceso semiquímico, (sosa en frío), y sus condiciones de operación en una planta piloto, para la producción de pulpa celulósica alcalina para poder elaborar hojas de papel empleando la pulpa del tallo de maíz.



## 1.0 HISTORIA DEL PAPEL

Desde sus orígenes, el hombre ha tenido la necesidad de expresar gráficamente su vida y sus anhelos. A medida que iban evolucionando las civilizaciones, fue necesario hacer un material que fuese más liviano, de fácil almacenamiento y transporte. Así se crearon, de forma independiente y en tres focos del planeta, tres soportes fibrosos de características muy similares: en el Mediterráneo el papiro, en América el papel precolombino y en el lejano Oriente, el papel tal como lo conocemos en nuestros días. Se tiene referencias históricas de que el primero en crear el principio técnico del papel fue un chino llamado Han Hsin, durante el reinado de Kao Tsu (247 a 195 a.C). Este hombre fue el primero en aprovechar el tejido procedente de los restos de los capullos de seda para formar una superficie lisa y blanca útil para escribir. Tres siglos después, en el año 105 d.C., fue Tsai Lun quien logro crear el primer papel de la historia a partir de fibras vegetales extraídas de trapos, redes de pesca, corteza de morera, ramio, cáñamo o bambú, Fue entonces, que hasta el siglo XIX siguieron utilizándose estas fuentes de fibra agrícolas mediante pequeños métodos de producción. [22]

Las primeras máquinas continuas de papel se patentaron en los años de cambio del siglo XIX al XX. Entre 1844 y 1884 se desarrollaron los primeros métodos para la obtención de pasta de madera, una fuente de fibra más abundante que los trapos o las hierbas; estos métodos implicaban la abrasión mecánica y la aplicación de procedimientos químicos a base de sosa cáustica, sulfitos y sulfatos. Con estos cambios se inició la era moderna de la fabricación de pasta y de papel. Siendo este el procedimiento más completo de fabricación de pasta y papel de la época actual conformado por etapas como la elaboración de la mecánica de la pasta, elaboración



de la química de la pasta, reciclado del papel usado, fabricación de papel y procesos de transformación. [23]

La pasta se elabora generalmente en grandes fábricas situadas en las mismas zonas donde se recolecta la fibra (es decir, las principales regiones forestales). Muchas de estas instalaciones también fabrican papel en sus diferentes tipos o cartón.

Las distintas operaciones de transformación se realizan habitualmente cerca de los centros de consumo. En los últimos años se ha acentuado la tendencia a que las empresas fabricantes de pasta y de papel pasen a formar parte de grandes compañías integradas de productos forestales. Estas compañías controlan las operaciones de recolección forestal las serrerías, la fabricación de pasta y de papel, así como los procedimientos de transformación. Una estructura así planteada les garantiza una continua fuente de fibra, utilización eficaz de los residuos de la madera y compradores asegurados, todo lo cual favorece al aumento de su cuota de mercado.

Algunas empresas han alcanzado ya niveles de producción de 10 millones de toneladas, semejantes a la capacidad total de países con la máxima producción. Muchas son multinacionales, y algunas tienen fábricas en 20 o más países de todo el mundo. Con todo, aun cuando muchas de las empresas y fábricas más pequeñas estén desapareciendo, la industria aún cuenta con centenares de miembros. [32]



## 2.0 COMPOSICIÓN Y ELABORACIÓN DEL PAPEL

El papel consiste en un gel de fibra - aire, obtenido a partir de materias primas vegetales que presentan una cantidad considerable de celulosa (más del 40 % en peso en base seca). La producción de papel está soportada principalmente en la madera debido a su alto contenido de celulosa. Sin embargo, actualmente se buscan fuentes alternativas que desestimulen el uso de este recurso favoreciendo la protección de los bosques. El principal constituyente sólido del papel es la celulosa, cuyas fibras se unen entre sí por medio de puentes de hidrógeno; estas fibras, luego de varios tratamientos mecánicos y químicos, son desleídas en agua y, posteriormente, mediante procedimientos apropiados se hacen endurecer y secar. [23]

La estructura básica de la pasta y el papel es un entramado de fibras de celulosa (un polisacárido con 600 a 1000 unidades de sacarosa) unidas mediante enlaces de hidrógeno. Una vez separadas del resto de componentes no celulósicos, mediante el proceso de elaboración de la pasta de papel, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, absorben los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón, y son flexibles, químicamente estables y blancas. Esos componentes no celulósicos son, en el caso de la madera, principalmente hemicelulosas (con 15 a 90 unidades iguales de sacarosa), ligninas (altamente polimerizadas y complejas, fundamentalmente monómeros de fenil-propano; actúan como aglutinante de las fibras), extractos (grasas, ceras, alcoholes, fenoles, ácidos aromáticos, aceites esenciales, oleorresinas, esteroides, alcaloides y pigmentos colorantes), minerales y otros compuestos inorgánicos. [15]

La proporción entre los componentes del residuo depende principalmente de la variedad, nivel de fertilización y tipo de cultivo.



En la Tabla 1.0 se muestra cómo varía la proporción relativa de estos componentes según la fuente de la fibra.

**Tabla 1.0 Componentes químicos de algunas fuentes de pulpa y de papel (%) [15]**

	<b>Maderas blandas</b>	<b>Maderas duras</b>	<b>Paja</b>	<b>Bambú</b>	<b>Algodón</b>
<b>Carbohidratos <math>\alpha</math> celulosa</b>	38-46	38-49	28-42	26-43	80-85
<b>Hemicelulosa</b>	23-31	20-40	23-38	15-26	n.d.
<b>Lignina</b>	22-34	16-30	12-21	20-32	n.d.
<b>Extraíbles</b>	1-5	2-8	1-2	0.2-5	n.d.
<b>Minerales y otros compuestos orgánicos</b>	0.1-7	0.1-11	3-20	1-10	0.8-2
	<b>n.d. = sin datos disponibles</b>				

La principal fuente de fibra para la fabricación de pulpa y de papel es la madera de coníferas y de especies arbóreas de hoja caduca. Fuentes secundarias son la paja de trigo, el centeno y el arroz; cañas, como el bagazo; los tallos leñosos del bambú, lino y cáñamo, fibras de semillas, hojas y cortezas, como las del algodón, el abacá y el henequén o sisal. La mayor parte de la pasta se hace de fibra virgen, aunque la producción de papel reciclado es cada vez mayor. [23]

Con la finalidad de comprender el proceso de elaboración de papel de forma general se plantean diagramas de flujo correspondiente a dos etapas: obtención de la pulpa para papel (diagrama 1.0) y elaboración de papel (diagrama 2.0):



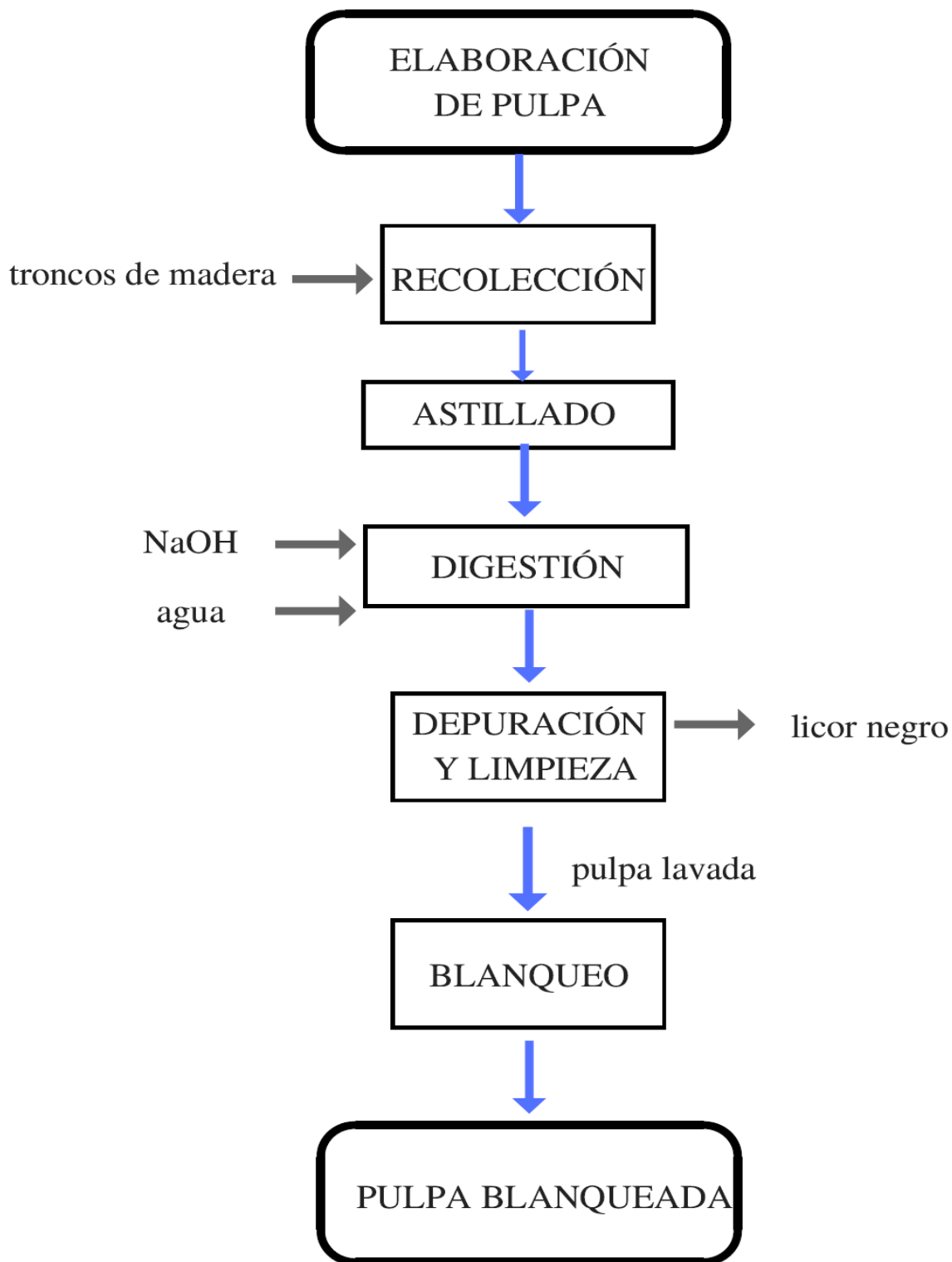


Diagrama 1.0 Obtención de pulpa para papel a partir de madera. [24]

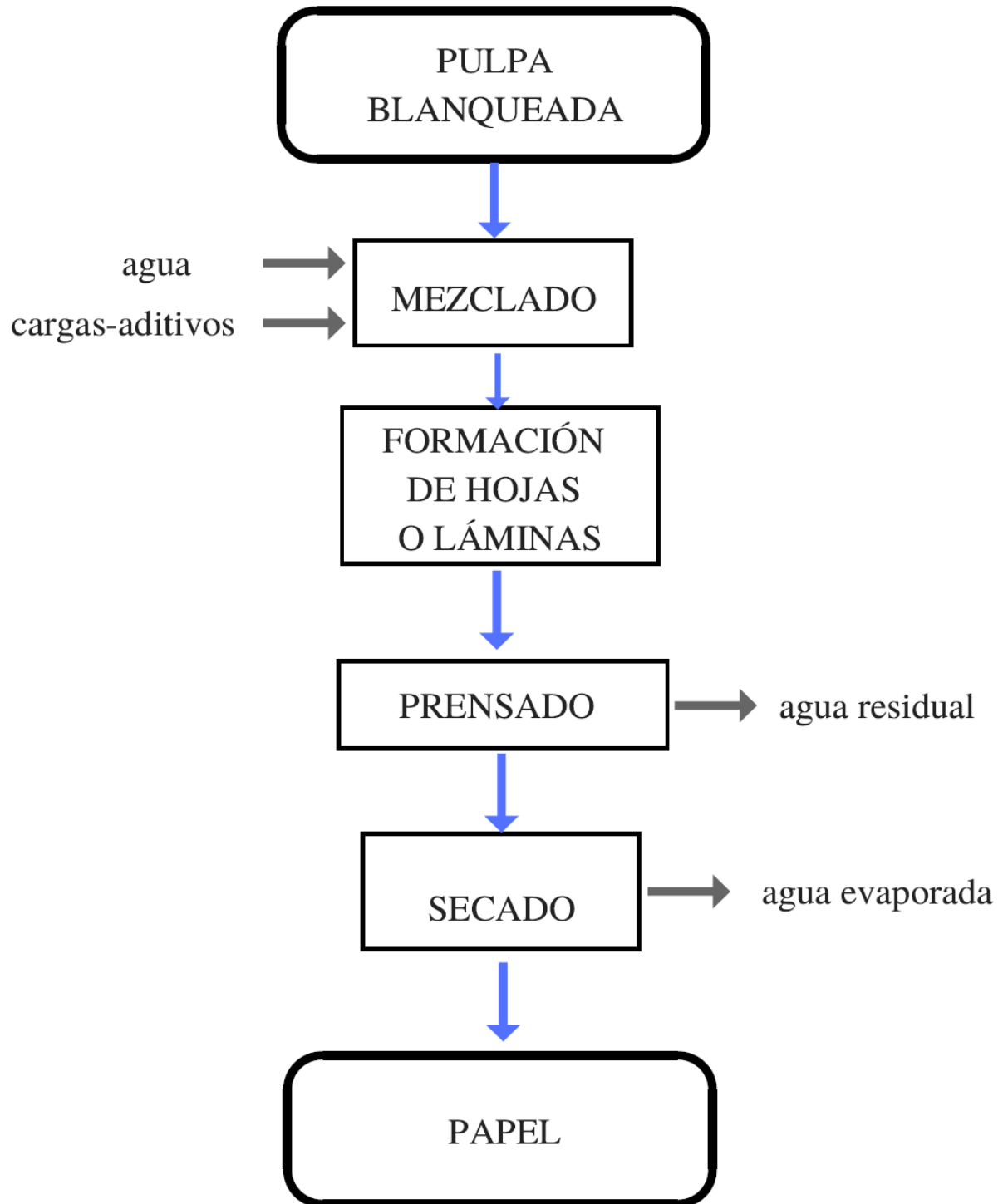


Diagrama 2.0 Elaboración de papel [24]



### 3.0 ASPECTOS GENERALES DE LA PLANTA DE MAÍZ

El maíz y sus parientes silvestres los teocintles, se clasifican dentro del género *Zea* perteneciente a la familia Gramínea o Poaceae, que incluye también a importantes cultivos agrícolas como el trigo, arroz, avena, sorgo, cebada y caña de azúcar. Con base en caracteres de la espiga o inflorescencia masculina, el género *Zea* se ha dividido en dos secciones luxuriantes y anuales [11].

Con base en diversos hallazgos, como cerámica y lítica principalmente, así como al estudio de sedimentos y depósitos de restos vegetales en contextos arqueológicos, se cree que el maíz fue domesticado hace aproximadamente 8000 años. Su evolución es producto de la interacción de los procesos biológicos y factores ecológicos con la dinámica cultural y los intereses del hombre [2].

#### 3.1 Características de la planta de maíz

La planta del maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual. El tallo es simple erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los 4 metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. Por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entrenudos y si una médula esponjosa si se realiza un corte transversal.



**Figura 1.0 Planta de maíz en estado de maduración media**



El maíz es de *inflorescencia monoica* con inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta.

En cuanto a la *inflorescencia* masculina presenta una *panícula* (vulgarmente denominadas espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos de polen. En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. En cambio, la inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen, alrededor de los 800 o 1000 granos y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral.

Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias. Se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes.

Las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta. En algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo y suele ocurrir en aquellas raíces secundarias o adventicias. [33]

#### *Desarrollo vegetativo del maíz*

Desde que se siembran las semillas hasta la aparición de los primeros brotes, transcurre un tiempo de 8 a 10 días, donde se ve muy reflejado el continuo y rápido crecimiento de la plántula.



**Figura 2.0 Siembra y aparición de primeros brotes de planta [25]**

### *Genética del maíz*

El maíz se ha tomado como un cultivo muy estudiado para investigaciones científicas en los estudios de genética. Continuamente se está estudiando su genotipo y por tratarse de una planta monoica aporta gran información ya que posee una parte materna (femenina) y otra paterna (masculina) por lo que se pueden crear varias recombinaciones (cruces) y crear nuevos híbridos para el mercado. Los objetivos de estos cruzamientos van encaminados a la obtención de altos rendimientos en producción. Por ello, se selecciona en masa aquellas plantas que son más resistentes a virosis, condiciones climáticas, plagas y que desarrollen un buen porte para cruzarse con otras plantas de maíz que aporten unas características determinadas de lo que se quiera conseguir como mejora de cultivo. También se selecciona según la forma de la mazorca de maíz, aquellas sobre todo que posean un elevado contenido de granos sin deformación.

El maíz se adapta muy bien a todos tipos de suelo, pero suelos con pH entre 6 a 7 son a los que mejor se adaptan. También requieren suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular.



### *Fertilización*

El maíz necesita para su desarrollo unas ciertas cantidades de elementos minerales. Las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está en defecto o exceso.

Se recomienda un abonado de suelo rico en potasio (K) y fósforo (P). En cantidades de 0.3 Kg de P en 100 Kg de abonado. También un aporte de nitrógeno N en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo. Durante la formación del grano de la mazorca los abonados deben de ser mínimos. Es importante realizar un abonado ajustándose a las necesidades presentadas por la planta de una forma controlada e inteligente.

**Nitrógeno (N):** La cantidad de nitrógeno a aplicar depende de las necesidades de producción que se deseen alcanzar, así como el tipo de textura del suelo. La cantidad aplicada va desde 20 a 30 Kg de N por ha. Un déficit de N puede afectar a la calidad del cultivo. Los síntomas se ven más reflejados en aquellos órganos fotosintéticos, las hojas, que aparecen con coloraciones amarillentas sobre los ápices y se van extendiendo a lo largo de todo el nervio. Las mazorcas aparecen sin granos en las puntas.

**Fósforo (P):** Sus dosis dependen igualmente del tipo de suelo presente ya sea rojo, amarillo o suelos negros. El fósforo da vigor a las raíces. Su déficit afecta a la fecundación y el grano no se desarrolla bien. [34]

**Potasio (K):** Debe aplicarse en una cantidad superior a 80-100 ppm en caso de suelos arenosos y para suelos arcillosos las dosis son más elevadas de 135-160 ppm. La deficiencia de potasio hace a la planta muy sensible a ataques de hongos y su porte es débil, ya que la raíz se ve muy afectada. Las mazorcas no granan en las puntas.



Otros elementos: Boro (B), Magnesio (Mg), Azufre (S), Molibdeno (Mo) y Cinc (Zn). Son nutrientes que pueden aparecer en forma deficiente o en exceso en la planta. Las carencias del Boro aparecen muy marcadas en las mazorcas con inexistencia de granos en algunas partes de ella.

Las primeras etapas de desarrollo del maíz son muy sensibles a la falta de agua y nutrientes por lo que la consolidación del cultivo demanda una buena inversión en insumos y labores culturales. Los suelos donde se cultiva el maíz, por lo general no tienen la capacidad para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de las plantas o no otorgan el rendimiento adecuado, para ello se debe recurrir al empleo de fertilizantes. El estudio de los factores que determinan la capacidad de absorción de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio y algunos micronutrientes es un tema de actualidad enfocado a incrementar la producción especialmente en suelos ácidos y alcalinos, los cuales representan la mayor superficie cultivable del planeta [34].

El desarrollo del sistema radicular del maíz puede ser embrionario y post-embrionario. El primero ocurre por una serie de divisiones asimétricas en las células del cigoto dando lugar a la formación del suspensor y al embrión. Después de las divisiones antes indicadas aparece el eje embrionario formado por el meristemo apical foliar y radicular en el coleoptilo. Finalmente, se desarrollan estructuras embrionarias tales como el primer primordio de la hoja, la raíz primaria (RP) y las raíces escutelares seminales (RES) [6].





### *La arquitectura de la raíz del maíz*

La raíz del maíz muestra una estructura radicular compleja comparada con el sistema radicular más simple de otras plantas. En el primer caso, las raíces se forman endógenamente en el embrión y consisten de la raíz primaria y de las raíces *escutelares* que aparecen durante la germinación. Las raíces *escutelares* seminales son una parte importante para la captación inicial de agua, nutrientes y para el establecimiento de la plántula en el suelo. Las raíces post-embrionarias se forman después de la germinación y continúan creciendo hasta formar un sistema radicular altamente ramificado en las plantas adultas. El



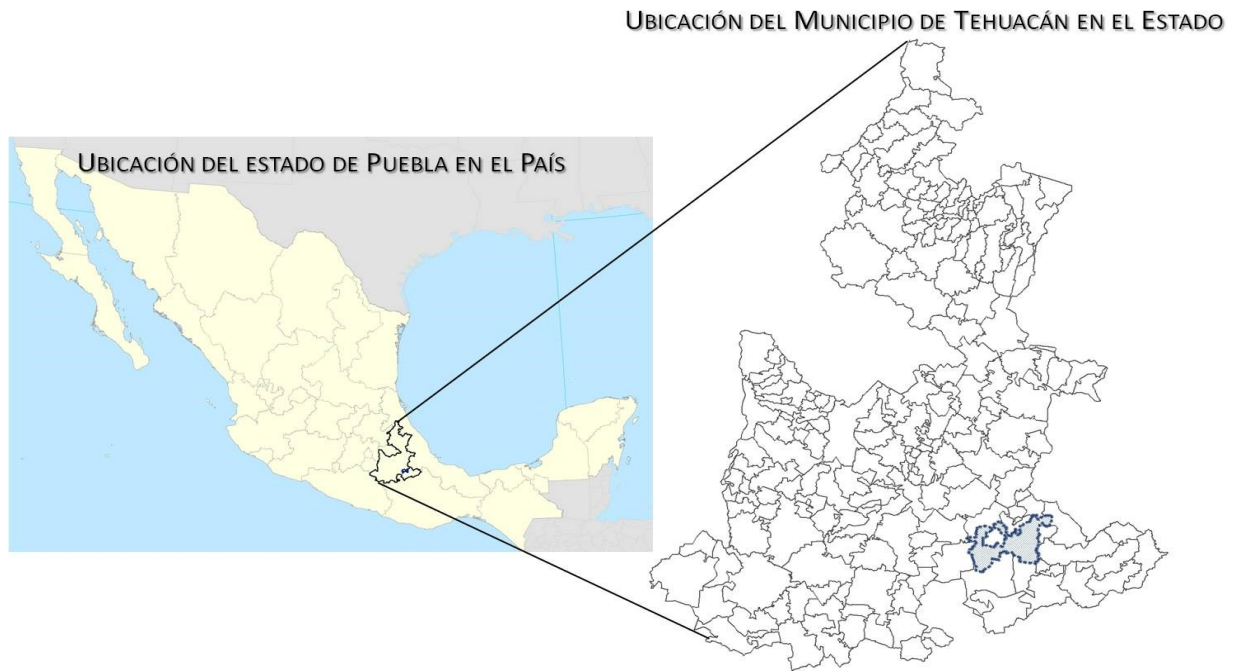
**Figura 3.0 Raíz de la planta de maíz**

sistema radicular post-embrionario está formado por raíces de corona o nodales (RC) y de raíces aéreas (RA) que surgen tardíamente en los nodos del tallo. [33]

### **3.3 Origen y distribución**

El maíz es una planta cultivada desde la antigüedad, aproximadamente hace 8000 años. Su origen parece situarse en la zona de México, donde se han encontrado los vestigios más antiguos. México es el principal productor de maíz blanco en el mundo. El centro geográfico de origen y dispersión se ubica en Coxcatlán en el valle de Tehuacán Puebla.





**Figura 4.0 Origen y dispersión de la planta de maíz [33]**

Las investigaciones sobre la constitución de los nudos cromosómicos de varias razas de maíz de México han confirmado que ocurrieron eventos independientes de domesticación del maíz, en cuatro centros localizados en México (dos en la región de Oaxaca-Chiapas, una en las tierras altas y una en las tierras medias al norte del estado de Morelos y Guerrero). Estos sitios son considerados como los lugares donde el germoplasma original del maíz fue domesticado de las poblaciones de Teocintle donde ya había ocurrido citogenéticamente la diversificación [34].

Aunque el período exacto de domesticación y los ancestros de los cuales surgió el maíz no son concluyentes. Se cree que hacia el año 3000 a.c. la domesticación de las plantas en el centro-sur de México era total y que la introducción del maíz al noroeste de México y el suroeste de E.U. puede atribuirse a la dispersión de grupos hablantes yuto-azteca que ocurrió durante los



primeros siglos inmediatamente después del periodo Altitermal (Holoceno Medio), aproximadamente 1500 años después de su domesticación inicial. [5][6]



**Figura 5.0 El maíz en los códices I**

México es el sexto productor de maíz en el mundo, pero también es un importante consumidor de este. Aunque tradicionalmente la producción nacional había cubierto la totalidad de la demanda del maíz blanco, actualmente el país tiene que importar más de 13 millones de toneladas, 5 millones de maíz blanco y 8.15 millones de maíz amarillo, lo que representa un déficit del 45 %.

Durante el ciclo comercial 2016/17 se observó el nivel de producción mundial más alto de la historia, al totalizar 1,025.6 millones de toneladas. Las expectativas de producción para el ciclo mencionado indican un incremento de 6.9 por ciento con respecto a la producción obtenida en 2015/16. Lo anterior ante un incremento de 1.6 por ciento en la superficie cosechada mundial, así como por crecimiento en la producción de maíz en Brasil, Estados Unidos, Argentina y Ucrania. En el caso de Estados Unidos se espera cosecha récord.

Para 2016/17, el 76 % de la producción mundial de maíz se concentra en cinco países: Estados Unidos, que participa con el 37 % del total 343 millones de toneladas (MMT); China,



que participa con alrededor de 21 % 343 millones de toneladas (MMT); Brasil, con una participación cercana a 8 % del total 79 MMT; y con menores participaciones se encuentran la Unión Europea Ucrania 28 MMT, y Argentina 25 MMT. Durante el año agrícola 2015 la producción de maíz grano en México creció a una tasa anual de 6.1 % para totalizar 24.69 millones de toneladas. La composición por tipo de maíz muestra que el 85.9 % de la producción nacional correspondió a maíz blanco, 13.6 % a maíz amarillo y el restante 0.5 % a otros tipos de maíz. Es de resaltar que la proporción de maíz amarillo se ha incrementado de 6.9 % en el año agrícola 2005 a 13.6 en 2015. Asimismo, se consumen anualmente alrededor de 20 MMT. (Ver ANEXO I). [20][32]

Por ciclo agrícola, la producción de maíz en México ocurre mayormente durante el ciclo Primavera-verano. Así, durante el año agrícola 2015, el 74.5 % de la producción de maíz provino del ciclo Primavera-verano, mientras que el restante 31.6 % se produjo en Otoño-Invierno

Durante el año agrícola 2015, diez estados concentraron aproximadamente el 80 % de la producción nacional de maíz grano. Sinaloa se ubica como el principal productor de maíz en el país con una participación de 21.8 %, lo cual representa un volumen de 5.3 millones de toneladas. En segundo lugar, se encuentra Jalisco con 13.5 % de participación y un volumen de producción de 3.3 millones de toneladas. El tercer lugar lo ocupa el Estado de México con una participación de 8.2 % del total y un volumen de 2.0 millones de toneladas. Otros importantes estados en la producción de este grano son: Guanajuato con 6 %; Veracruz el 5 % y Puebla con 4 %. Michoacán, Chiapas y Guerrero contribuyen con el 7 % cada uno y en conjunto, estas entidades aportan cerca del 59 % de la producción a nivel nacional.



En cuanto a la producción de maíz amarillo, cuatro entidades contribuyen con el 94 % de la producción total: Jalisco (35 %), Michoacán (25 %), Sinaloa (21 %) y Guanajuato (13 %) (Cifras son aproximadas). (Ver ANEXO). [20]

El rendimiento promedio de maíz blanco ha crecido aproximadamente a una Tasa Máxima de Crecimiento Anual de 2.1 % durante los últimos cinco años. No obstante, en 2011 se esperaba una reducción en el rendimiento promedio nacional y se ubicó en 3 ton/ha (versus 3.2 en 2010), debido a la caída de éste en Sinaloa.

Para 2020, se estima un consumo de 24.6 millones de toneladas, dadas las condiciones actuales, se estima que, en promedio, los inventarios finales de maíz blanco oscilen en aproximadamente 2 MMT por año agrícola. Además, a lo largo del periodo 2012 al 2020, se estima que México será autosuficiente en este grano. (SIAP, 2011). [20] [32].

El panorama agroalimentario del año 2016 señala la cantidad de maíz producida en distintos estados, por tanto nos enfocamos en el estado con mayor producción a este año, siendo el caso de Sinaloa en el ciclo agrícola primavera verano, produciendo 5380 toneladas anuales. Las recolecciones más altas se llevan a cabo en los meses de diciembre y enero, llegando a recolectar más de 20 toneladas. Entre los meses de mayo y junio se presentan las bajas recolecciones, esto nos ayuda a determinar que el 20 % de los residuos de esta cosecha serán favorables para la propuesta, lo que permiten contemplar la idea de la creación de una empresa dedicada a procesar dicho material.



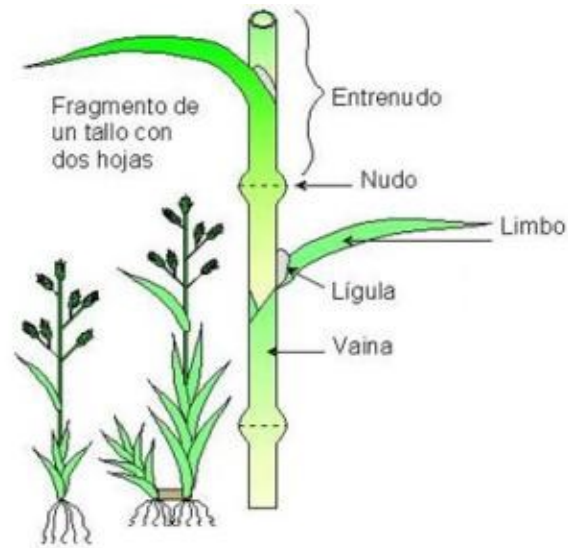
### 3.4 Morfología del tallo de maíz

La planta de maíz presenta un tallo principal, el cual alcanza la superficie del suelo al estado de quinta hoja; a partir de la sexta hoja, se inicia un rápido crecimiento del tallo en altura, el que se manifiesta especialmente a través de la elongación de los internodos inferiores. Al estado de ocho hojas es posible apreciar a simple vista, en el extremo apical del tallo. (Ver figura 6.0)



**Figura 6.0 Planta disectada al estado de siete hojas desplegadas; el tallo ya ha sobrepasado la superficie del suelo [29].**

Sus funciones principales son las de sostén hojas, flores y frutos además de transporte de compuestos fotosintéticos, entre las raíces y las hojas. Tiene una capa externa fibrosa que aporta la mayor parte de la fibra celulósica y una médula interna que consiste principalmente en haces vasculares que transportan los líquidos dentro de la planta. Posee puntos engrosados (nudos) sobre los que se desarrollan las hojas; A la porción de tallo situada entre dos nudos consecutivos se le denomina entrenudo; presenta además una yema terminal en el extremo apical y varias yemas axilares que se diferencian en las axilas de las hojas. (Ver figura 7.0)



**Figura 7.0 Modelo de estructura del tallo [29]**

El tallo tiene aspecto de caña, con los entrenudos rellenos de una médula esponjosa, erecto, sin ramificaciones y de elevada longitud pudiendo alcanzarlos 4 metros de altura. El maíz tiene escasa capacidad de ahijamiento, de hecho, la aparición de algún hijo es un efecto no deseado que perjudica la capacidad productiva.

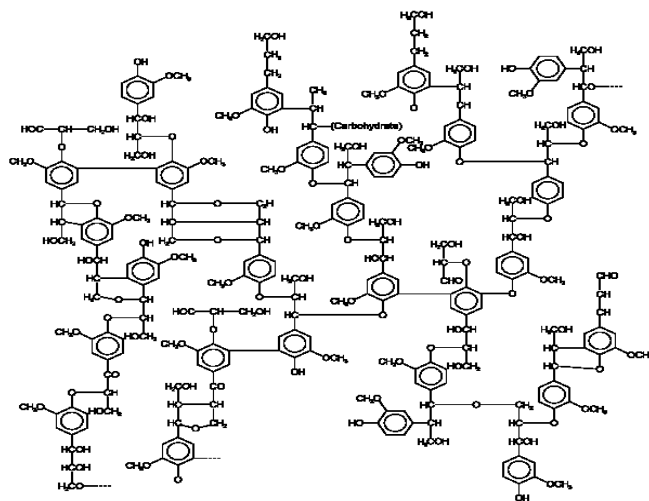


**Figura 8.0 Tallos con altura de 4 metros [29].**



### 3.5 Lignocelulosa en el tallo de maíz

La lignina es un polímero natural de alto peso molecular presente en las paredes celulares de las plantas, estructuralmente se define como un polímero aromático, amorfo, altamente complejo. Su red tridimensional compleja sirve como una matriz continua que confiere soporte estructural, impermeabilidad y resistencia contra el ataque de microorganismos y tensión oxidativa de las plantas. En la fig. 9 se muestra un probable modelo de la estructura de la lignina, pues nos es sabido con certeza la estructura de esta en la naturaleza.



**Figura 9.0 Probable modelo de la estructura de la lignina según Adler 1977 [25]**

El polímero natural más abundante en la naturaleza es la celulosa que, en conjunto con hemicelulosa y lignina, son los principales componentes de las plantas. La lignina está presente en las plantas para las cuales la conducción de agua es importante, su principal función es asistir al movimiento de agua ayudando a canalizarla a las áreas críticas de la planta. El más grande interés de estudio de esta molécula se enfoca en su presencia en los árboles, cuyo contenido se encuentra entre 19 % y 35 % [23], este porcentaje depende del tipo de árbol y/o fibra vegetal.

Dentro de las propiedades que se evalúan en la pulpa de papel están la celulosa, la hemicelulosa que rodea los filamentos de la celulosa y ayuda en la formación de microfibrillas, es decir funcionan como material de soporte en la pared celular, la holocelulosa que representa la fracción total de polisacáridos, es decir, celulosa + hemicelulosa, la lignina, les da dureza y



resistencia pero en el caso del papel se busca eliminarla para facilitar la adhesión de las fibras. [17].

En la tabla 2.0 se muestran los resultados de evaluaciones químicas realizados por la Universidad de Caldas en el año 2016 [3], presentando los contenidos de celulosa, siendo las maderas las que presentan contenidos más altos, pero indicando que también hay contenidos significativos en otros materiales como lo es el tallo de maíz.

**Tabla 2.0 Materias primas usadas para la elaboración de papel [3]**

<b>Material</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>Lignina</b>
<b>Maderas blandas</b>	38-46	23-31	22-34
<b>Maderas duras</b>	38-49	20-40	16-30
<b>Paja</b>	28-42	23-38	12-21
<b>Bambú</b>	26-43	25-26	30-32
<b>Algodón</b>	80-85	n.d.	n.d.
<b>Hoja tusa del maíz</b>	18-40	11.34-31	14-19
<b>Tallo de clavel</b>	40-50	25-45	20-25
<b>Corona piña</b>	11-45	14-50	10-30
<b>Tallo rosa</b>	45-50	20-25	20-25
<b>Cáscara de naranja</b>	16.2	13.8	1
<b>Tallo maíz</b>	50	20	3
<b>Bagazo plátano</b>	55.65	14	11.58
	n.d.= sin datos disponibles		

En la tabla se muestra la composición química expresada en porcentaje sobre materia seca.





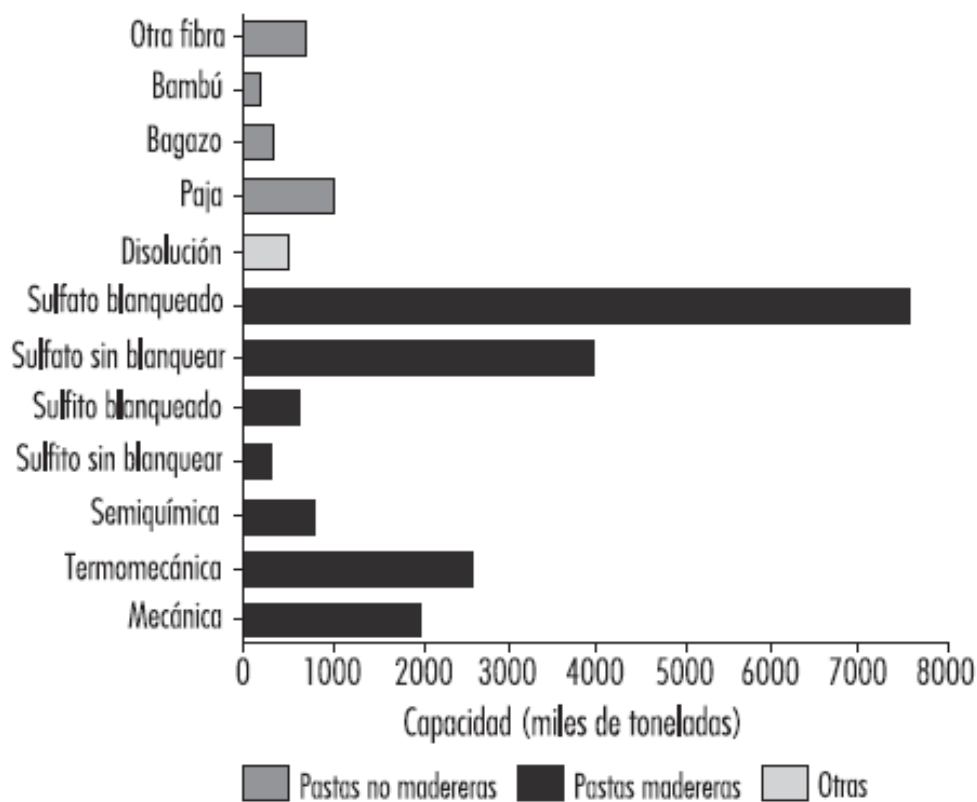
## **4.0 SITUACIÓN INDUSTRIAL PAPELERA EN EL MUNDO**

### **4.1 La producción y consumo de papel a nivel mundial**

La industria del papel mueve en el mundo alrededor de 1.27 billones de dólares, y tiene como principales actores a Estados Unidos, Brasil y China.

Según la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura hasta 2013 los mayores consumidores de pulpa de papel fueron: Estados Unidos de América (26 %); China (18 %); Japón (6 %); Suecia (5 %); Finlandia (5 %); Canadá (5 %); Brasil (3 %); Federación de Rusia (3 %); Alemania (3 %) e India (3 %). Sin embargo, el país con mayor producción de papel y cartón es China (26 %), seguido por Estados Unidos (19 %) y Japón (7 %). China también es el país que más recupera papel y cartón (23 %). [36]

La producción a partir de la madera supuso un 88 % de la producción mundial de pasta en 1994 (176 millones de toneladas, grafica 1.0).



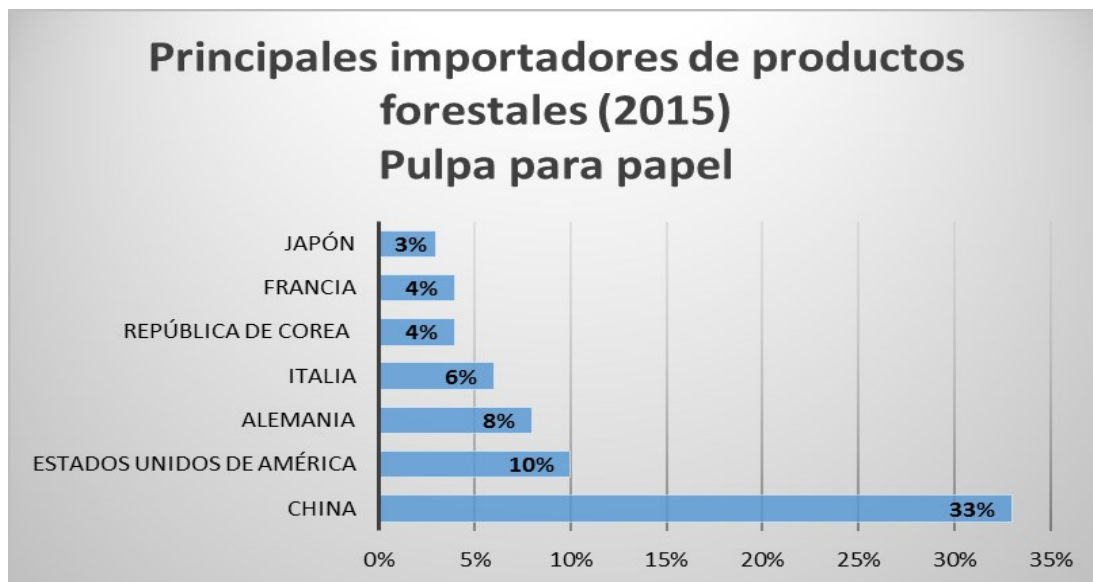
Fuente: FAO 1995.

Gráfica 1.0 Producción de distintos tipos de Pulpa [36]

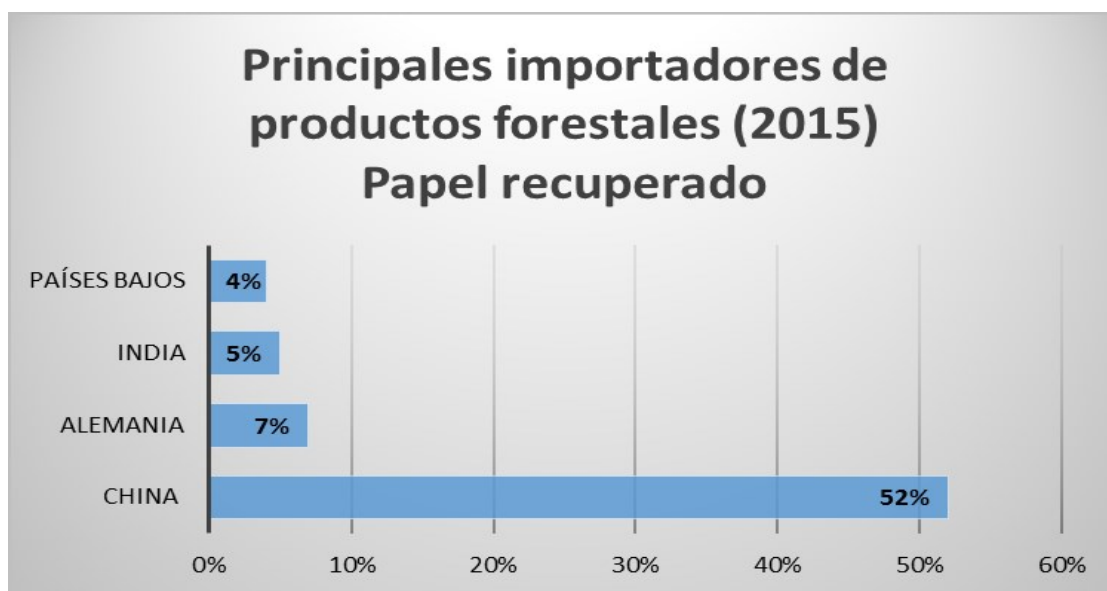
## 4.2 Importaciones y exportaciones de productos forestales

### Principales importadores de productos forestales (2015)

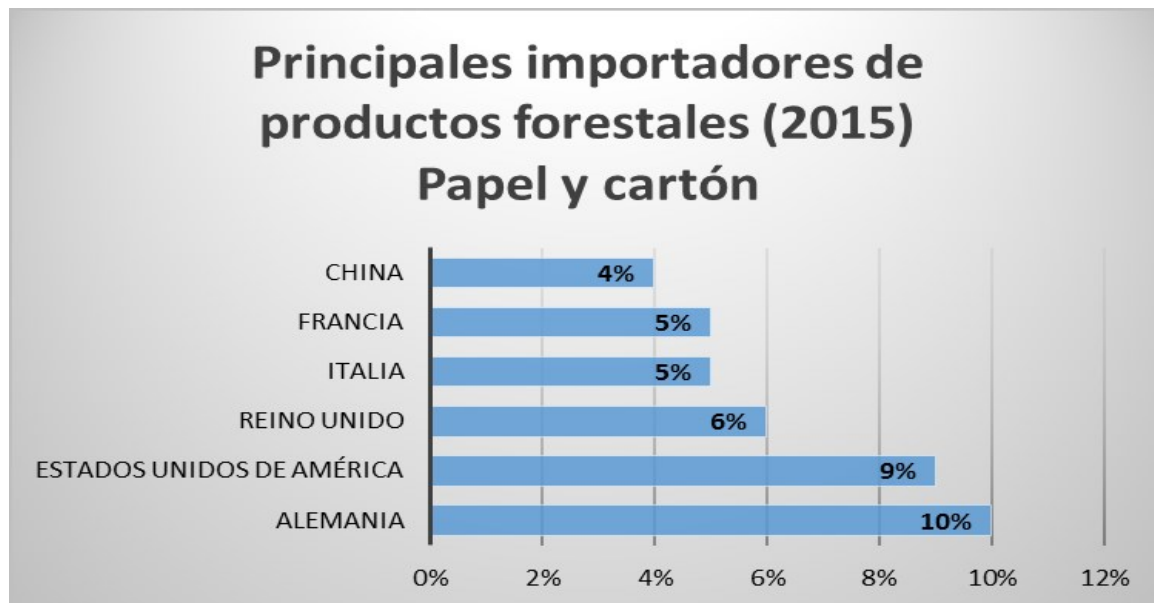
A continuación, se muestran cifras de los productos de papel importados durante 2015 para tener un panorama de comportamiento de estos productos a nivel mundial:



Gráfica 2.0 Principales importadores de productos forestales pulpa para papel. (FAO)[37]



Gráfica 3.0 Principales importadores de productos forestales papel recuperado. (FAO)[37]



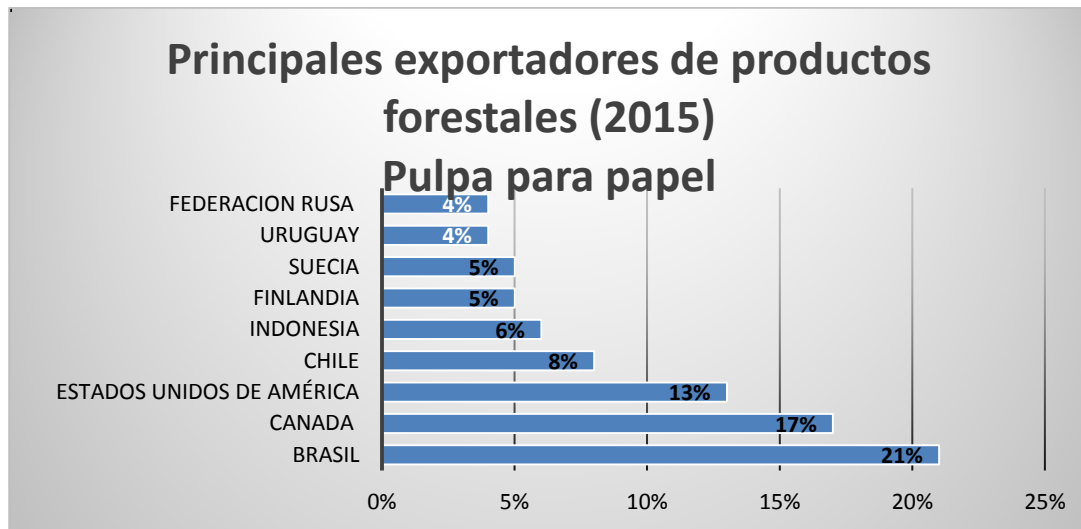
Gráfica 4.0 Principales importadores de productos forestales papel y cartón. (FAO)[37]

Para los fines de investigación de este proyecto, centramos la atención en los indicadores de importación de pulpa para papel, donde podemos observar las cifras de China como el principal importador de pulpa con un 33 %, en contraste con otras actividades económicas de este país, se ve en la necesidad de importar la pulpa de diversos países. A la lista se suma EUA y Alemania, resulta importante comparar, ya que se sabe en estos países la promoción por perseverar el medio ambiente es importante por cual deciden no afectar sus bosques con esta actividad económica resultando preferente la importación de la pulpa.

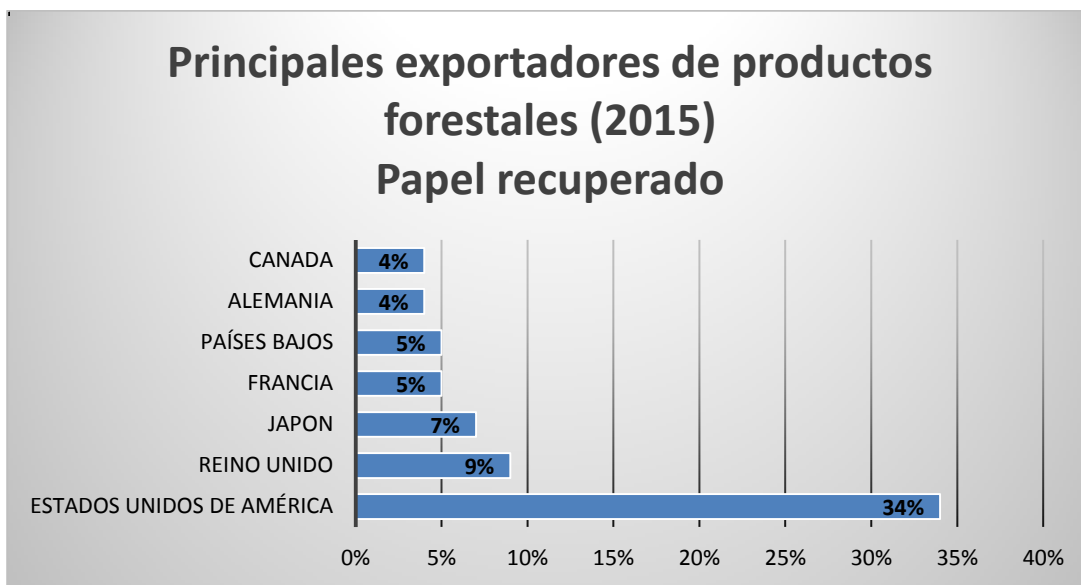


### Principales exportadores de productos forestales

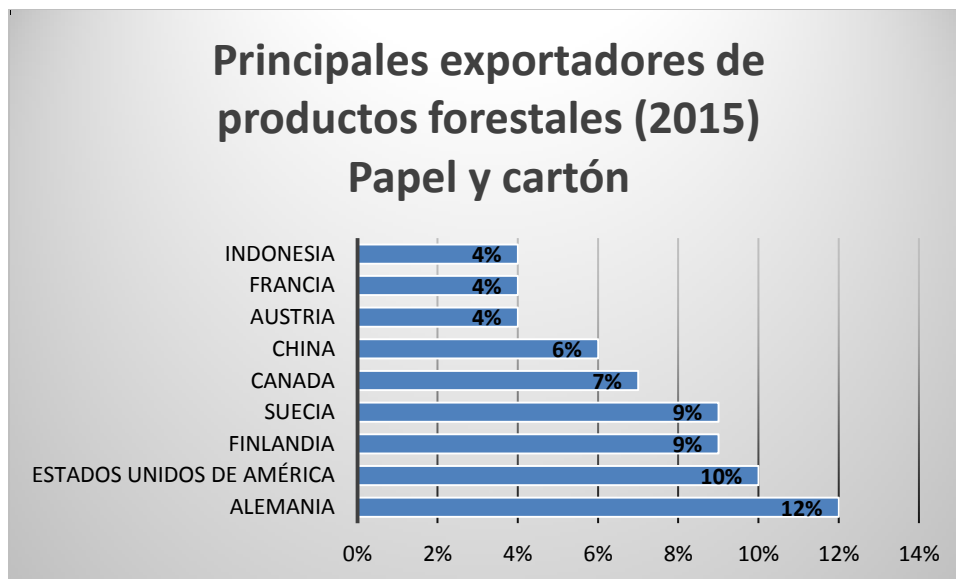
Para completar el panorama mundial, observemos las cifras de los mismos productos forestales en exportaciones:



Gráfica 5.0 Principales exportadores de productos forestales pulpa para papel. (FAO)[37]



Gráfica 6.0 Principales exportadores de productos forestales papel recuperado. (FAO)[37]



Gráfica 7.0 Principales exportadores de productos forestales papel y cartón. (FAO)[37]

Brasil y Canadá encabezan la lista en la categoría de exportación de pulpa, debido a que son países con regiones boscosas es factible la obtención de fibras forestales para la fabricación de pulpa en grandes cantidades para cubrir la demanda de exportaciones.



## 5.0 SITUACIÓN INDUSTRIAL PAPELERA EN MÉXICO

### 5.1 Participación del sector celulósico-papelero en el Producto Interno Bruto Nacional

La Industria del papel está conformada por dos ramas de actividad económica, las cuales según el Sistema de Cuentas Nacionales de México aportaron en forma conjunta el 2.0 % al PIB manufacturero, en promedio durante el periodo 2003-2012. En particular, la Fabricación de productos de papel y cartón contribuyó con el 1.3 % del PIB manufacturero y la Fabricación de celulosa, papel y cartón con 0.7 %. Es interesante observar que el peso de la Industria del papel en el PIB de las manufacturas aumentó de 2 % en 2008 a 2.3 % en el año de la crisis de 2009, lo que muestra que la Industria del papel resultó menos afectada por esta situación económica que las Industrias manufactureras en su conjunto. [12]

Las empresas que conforman la Industria del papel dieron empleo a 101 195 personas, que representan el 2.2 % de la ocupación en las Industrias manufactureras.

En esta industria predomina la mano de obra, incluso en mayor proporción que en las manufacturas. Cabe notar que, en el caso de la Fabricación de papel a partir de pulpa, ésta se encuentra concentrada en pocas unidades económicas, siendo el 8.5 % del total de las plantas industriales que produjeron el 35.8 % y generaron el 20.7 % de los empleos. Es decir, es una actividad concentrada e intensiva en capital. [12]



## 5.2 Productos de papel

La producción de la Industria del papel se destina principalmente a satisfacer la demanda final 64 %, constituida por la demanda de las familias, gobierno y las exportaciones; y el resto, 36 % se destina a cubrir la demanda que tienen las empresas para realizar sus actividades económicas (demanda intermedia).

Los productos finales de la fábrica de pasta y de papel dependen del proceso de preparación de la pasta, pero pueden incluir pasta papelera y varios tipos de productos de papel y cartón.

Existen dos procesos básicos para lograr obtener las pastas:

1.- Proceso mecánico, es el más simple y consiste en un tren de “molido” de la madera a base de rodillos, presión, calor, y agua. La celulosa resultante de este proceso se denomina celulosa mecánica.

2.- Proceso químico, también llamado sulfato o sulfito, consiste en introducir las astillas de madera a un digestor, que a base de calor, presión y productos químicos degrada las astillas separando las fibras individuales. En los siguientes capítulos de este escrito, detallaremos este proceso.

Dependiendo el uso final que se dará al papel, será el proceso utilizado, por ejemplo, la pasta mecánica, relativamente frágil, se transforma en productos de un solo uso, como papel prensa y papel de seda. La pasta mecánica o kraft se transforma en productos de papel de uso múltiple, como papel de escritorio de alta calidad, libros o bolsas para comestibles. La pulpa al sulfito, es celulosa que se puede utilizar en diversos productos finales, tales como papeles especiales, rayón, película fotográfica, plásticos, adhesivos y hasta componentes para helados y





dulces. Las pastas mecano-químicas son excepcionalmente consistentes, ideales para la estructura necesaria para los recipientes de cartón ondulado. Las fibras de la pasta de papel reciclado son generalmente más cortas, menos flexibles y menos permeables; por consiguiente, no pueden utilizarse en productos de papel de alta calidad. El papel reciclado se utiliza, por tanto, para fabricar productos suaves y blandos, como el papel de seda, el papel higiénico, las toallitas y las servilletas de papel.

A continuación, una lista de las amplias utilidades del papel y su consumo:

- Empaques, ya sea en sacos o paquetes.
  - Papel tapiz, papeles aislantes, materiales para impermeabilizar, o para laminados decorativos de muebles.
  - Papel para fotocopiadoras papeles milimetrados, papel secante, papel carbón, cajas para archivo, carpetas, boletería publicitaria, catálogos, manuales.
  - En el dinero, chequeras, giros postales, papel de seguridad con marcas especiales que solo son visibles con luz ultravioleta.
  - Filtros, facias, señalamiento de vialidad.
  - Papel encerado, toallas de cocina, servilletas papel higiénico.
- Libros, manuales, mapas boletas, cuadernos.
- Cartas de menú, sombreros de papel, conferí, juegos de mesa, boletos para eventos, envolturas.
- Empaques para alimentos.
- Etiquetas, carnets de identidad,
- Embalaje y protección para artículos frágiles.
- Aislantes, filtros desde aire, agua, medicinas, químicos.
- Papel anti grasa, antiadherente, médico recubiertos, base laminación.
- Papeles para artes gráficas
- Sobres, periódicos, revistas, sellos postales, tarjetas de felicitación, calendarios, directorios telefónicos, agendas.



### 5.3 Alternativas para fabricación de papel sin daño al medio ambiente

Nuestro consumo de papel no deja de aumentar, el impacto de la fabricación del papel sobre el bosque está claro, tal y como nos recuerda Greenpeace, la destrucción de bosques autóctonos y su sustitución por plantaciones forestales ha resultado muy dañino para el entorno y sigue siendo un problema sin solucionar en buena parte del mundo.

No solo por la pérdida de hábitat para especies protegidas o por la desaparición de flora en vías de extinción, sino también por el daño que supone para el equilibrio del ciclo hídrico a nivel regional y mundial. Sin duda, la sostenibilidad, sigue siendo una tarea pendiente. Pero eso no es todo, porque una vez conseguida la materia prima, el proceso de fabricación añade un daño ambiental que va más allá de la fabricación.

El sector industrial es el segundo mayor consumidor de energía en el país. Durante 2016 alcanzó 31.7 % del consumo energético total, mostrando un crecimiento de 4.9 % respecto al año anterior, para ubicarse en 1,680.79 PJ [34].

Las industrias que se identifican como las mayores consumidoras de energía, de acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte son:

- Industria básica del hierro y del acero
- Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas
- PEMEX Petroquímica
- Industria química
- **Fabricación de pulpa, papel y cartón**
- Fabricación de vidrio y productos de vidrio
- Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas



- Elaboración de azúcares
- Elaboración de cerveza
- Elaboración de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purificación y embotellado de agua
- Construcción
- Fabricación de automóviles y camiones
- Fabricación de productos de hule
- Fabricación de fertilizantes,
- Elaboración de productos de tabaco

La industria papelera y de celulosa ocupa el quinto lugar del sector industrial en consumo mundial de energía, y utiliza más agua por cada tonelada producida que cualquier otra industria. También, la industria pastero-papelera se encuentra entre los mayores generadores de contaminantes del aire y del agua, así como gases que causan el cambio climático. [35]

En la siguiente lista incluimos ciertos criterios a tener en cuenta a la hora de elegir el papel menos perjudicial para el medio ambiente, debemos tener en cuenta tanto el origen de la fibra de celulosa, como los procesos de producción y blanqueo. Así, son preferibles:

- Como primera opción y para la mayoría de los usos, el papel 100 % reciclado post-consumo. Otras opciones con alto contenido en fibra reciclada también son bienvenidas.
- Cuando es imprescindible el papel blanco, de fibra virgen, hay que asegurarse que no proceda de empresas y/o países donde se están destruyendo bosques de alto valor para la conservación, incluidos bosques primarios.



- Existen en el mercado papeles de oficina fabricados a partir de fibras vegetales (bagazo de caña de azúcar, por ejemplo) y/o cultivos no madereros. Esto disminuye la presión sobre los bosques y la proliferación de plantaciones.

- El blanqueado deber ser totalmente libre de cloro. Se utiliza el término procesado totalmente libre de cloro (TCF) para la fibra virgen.

Bajo estas premisas, es así como se sugiere la alternativa de elaboración de papel a partir de fibra vegetal.



## 6.0 FIBRAS VEGETALES NO MADERABLES

### 6.1 ¿Qué son las fibras vegetales no maderables?

Se entiende por fibras no maderables los materiales vegetales celulósicos distintos de la madera de los que pueden extraerse fibras para la fabricación de papel. De acuerdo con la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [36], las fibras vegetales no maderables son bienes de origen biológico, distintos de la madera, derivados del bosque, de otras áreas forestales y de los árboles fuera de los bosques. Pueden recolectarse en forma silvestre o producirse en plantaciones forestales o sistemas agroforestales. Estos productos también son utilizados como alimentos y aditivos alimentarios (semillas comestibles, hongos, frutos, condimentos, aromatizantes), fibras, instrumentos o utensilios, resinas, gomas, y otros usados con fines medicinales, cosméticos o culturales. Los materiales no maderosos más usados por la industria del papel son paja, bagazo de caña de azúcar, bambú, cáñamo, kenaf, yute, sisal, abacá, borra de algodón (fibras cortas que quedan una vez desmotado el algodón) y carrizo. La mayoría de las plantas no maderables son anuales y alcanzan su máximo potencial fibroso en una determinada estación. [1]

Actualmente la madera es, con mucho, la principal materia prima para la industria mundial de la pasta y el papel. Sin embargo, desde una perspectiva histórica, la madera es una materia prima relativamente nueva en la industria papelera. El papel se hacía antaño exclusivamente a partir de fibras vegetales no maderables.

A escala mundial, las fibras no maderables aportan una pequeña parte de la materia prima suministrada para la fabricación de papel y de cartón. En muchos países, sin embargo, estas fibras se utilizan todavía ampliamente y tienen una notable importancia por su volumen absoluto



y en porcentaje del suministro total de pasta. La tabla 3.0 da una idea del uso actual de fibras no maderables en la industria papelera en 18 países que abarcan casi el 98 % de la producción mundial.

**Tabla 3.0 Principales usuarios de las fibras no maderables en la industria papelera. [30]**

País	1993		1998	
	Capacidad de fabricación de pulpa (miles de toneladas)	Porcentaje de la capacidad total	Capacidad de fabricación de pulpa (miles de toneladas)	Porcentaje de la capacidad total
<b>China</b>	15246	86.9	16830	84.3
<b>India</b>	1307	550.5	2001	61.3
<b>Pakistán</b>	415	100	415	100
<b>México</b>	321	29.2	324	29.3
<b>Perú</b>	298	95.2	296	95.2
<b>Indonesia</b>	267	22.1	267	10.1
<b>Colombia</b>	218	45.1	218	37.2
<b>Tailandia</b>	209	100	509	100
<b>Brasil</b>	196	3.1	238	3.3
<b>Venezuela</b>	185	75.2	187	75.4
<b>Estados Unidos</b>	179	0.3	204	0.3
<b>Grecia</b>	150	85.7	160	84.2
<b>España</b>	140	7.9	141	7.7
<b>Argentina</b>	140	14.6	140	12.8
<b>Egipto</b>	127	100	127	100
<b>Italia</b>	120	13.3	120	13.3
<b>Cuba</b>	108	100	108	100
<b>Turquía</b>	103	16.5	103	16.5

La región que ha invertido más tiempo y recursos para hacer pasta a partir de materiales no maderables es la de Asia y el Pacífico. En particular, China y la India van a la cabeza, por volumen, en la utilización de plantas no maderables para fabricar papel. En América del Norte, América Latina, Europa, las Repúblicas Rusas y África, el uso de fibras no maderables ha sido relativamente limitado, es aquí donde se tiene la oportunidad de explotar estas fibras.



## **6.2 Ventajas e inconvenientes del uso de fibras no maderables en la industria papelera**

Los bosques fueron estudiados durante mucho tiempo bajo el enfoque de obtención de madera con fines industriales; incluso algunas directrices en la ordenación de los bosques tropicales tenían como objetivo la producción de madera [31]. Afortunadamente los bosques han cobrado un renovado interés como fuente de diversos productos distintos a la madera y como generadores de múltiples servicios para las poblaciones locales.

El aprovechamiento de las Fibras No Maderables (FNM) es diverso y tiene varios niveles de incidencia, desde el genético, de individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas. Es entonces donde las fibras no maderables nos muestran sus ventajas, algunas de estas fibras utilizadas como materias primas tienen elevados rendimientos anuales por hectárea. Tal es el ejemplo del kenaf, fibra no maderable, su rendimiento anual medio por hectárea, es casi el doble que el de maderas blandas de crecimiento rápido. Las plantas no maderables tienen menor contenido de lignina que las maderas y generalmente es más fácil deslignificarlas, ya que tienen un nivel más bajo de energías de activación. [9]

La producción y comercialización de los FNM pueden proveer opciones atractivas económicamente para las comunidades (colonos, campesinos e indígenas) ayudando a incrementar sus ingresos y ofreciendo una oportunidad de desarrollo.

La producción de FNM es más favorable para el uso de los bosques tropicales que otros usos alternativos de la tierra, siendo un paradigma en la valoración y conservación de los bosques tropicales.



Incrementando el valor de los FNM obtenidos por la población local, se aumentan los incentivos para la conservación del bosque, contribuyendo en la prevención del cambio de uso de la tierra con otros fines.

La recolección de FNM es más benigna que el aprovechamiento de la madera u otros usos del bosque, logrando a su vez una base para el manejo forestal sostenible.

Fabricando papel a partir de fibras no maderables se contribuiría a reducir la demanda de madera para pasta que pesa sobre los bosques naturales y las plantaciones en gran escala. En ciertas condiciones climáticas, la producción de fibras no maderables es ahora una alternativa razonable a las plantaciones de árboles.

En cuanto a los inconvenientes, la disponibilidad de un suministro de fibra constante durante todo el año es una exigencia primaria de las fábricas de papel. Dado que la mayoría de las plantas no maderables son anuales, es preciso desarrollar una gran capacidad de almacenamiento para asegurar un suministro constante. Otra complicación es que la mayoría de las plantas productoras de fibras no maderables tienen un alto volumen y una baja densidad en comparación con la madera. El elevado contenido de sílice otro problema de la generalidad de las fibras no maderables. La mayoría de las industrias papeleras que utilizan estas fibras son pequeñas y no tienen instalaciones químicas de recuperación adecuadas para operar con los grandes volúmenes de sílice que es preciso eliminar.

Otra desventaja del uso de fibras no maderables pueden ser los altos insumos requeridos para cultivar y recolectar estas cosechas anuales.

Finalmente, todo acto relacionado con las FNM debe entender que para lograr la sostenibilidad del uso de un recurso, las tasas de recolección no deben exceder la capacidad de





las poblaciones para sustituir a los individuos extraídos, además de reconocer que estos productos se mueven bajo una diversidad de variables que pueden incidir en su sostenibilidad.

### **6.3 Propiedades físicas y químicas de fibras vegetales no maderables a emplearse en la elaboración de papel**

La estructura básica del papel es un entramado de fibras de celulosa (un polisacárido con 600 a 1000 unidades de sacarosa) unidas mediante enlaces de hidrógeno. Una vez separadas del resto de componentes no celulósicos mediante el proceso de elaboración de la pasta de papel, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, absorben los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón, y son flexibles, químicamente estables y blancas. Esos componentes no celulósicos son, en el caso de la madera, principalmente hemicelulosas (con 15 a 90 unidades iguales de sacarosa), ligninas (altamente polimerizadas y complejas, actúan como aglutinante de las fibras), extractos (grasas, ceras, alcoholes, fenoles, ácidos aromáticos, aceites esenciales, oleorresinas, esteroides, alcaloides) [10].

Para la elaboración del papel es determinante conocer las propiedades físicas y químicas de la materia prima a usar, ya que de estas depende directamente la calidad del papel y se establece toda la línea de producción. Dentro de las propiedades físicas que se evalúan comúnmente se encuentran el volumen, tamaño, densidad real y aparente, así como los residuos el grado de madurez, el contenido de humedad y la resistencia, entre otros. Las propiedades químicas son aún más importantes, pues determinan la calidad de las fibras, es decir la resistencia a la tracción, flexibilidad, la estabilidad, la adhesión, el color, absorción de los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón. [3][17]



Dentro de las propiedades químicas que se evalúan en la pulpa de papel están el contenido de celulosa, hemicelulosa, holocelulosa, y de lignina que en el caso del papel se busca eliminarla para facilitar la adhesión de las fibras. [3]



## 7.0 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PULPA PARA PAPEL

La fabricación de pasta de papel se basa en una separación de las fibras que componen a la materia prima, mediante el empleo de técnicas que eviten, en lo posible, la rotura de estas. Para ello existen dos grandes tipos de procesos de pasteado que, dependiendo del debilitamiento físico y químico de los enlaces interfibrilares, además, del tipo de energía empleada para esta operación, será la definición. Estos procesos fueron mencionados con anterioridad en el capítulo 5.2; en este capítulo definimos los distintos procesos.

Cuando el proceso de separación de las fibras se basa en el empleo de reactivos químicos, para disolver la lignina que las mantiene unidas, las pulpas reciben el nombre de **pulpas químicas**. Si el tratamiento químico empleado es suave, será necesario aplicar energía mecánica para la completa separación de las fibras. Las pulpas obtenidas en este caso reciben el nombre de **pulpas semiquímicas**. Cuando la energía empleada para separar las fibras es únicamente energía mecánica, las pulpas producidas reciben el nombre de **pulpas mecánicas o pulpas de alto rendimiento**.

Las propiedades y usos de las pulpas son diferentes y, en general, las pulpas químicas son pulpas resistentes, mientras que las mecánicas presentan buenas características para la impresión.

### 7.1 Procesos de fabricación de pulpas químicas

Existen principalmente dos tipos de procesos de fabricación de pulpa química papelera: los procesos alcalinos (proceso al sulfato y a la sosa) y el proceso ácido al sulfito, todos ellos con rendimientos cercanos al 50 %. Las reacciones de lignina durante la digestión son complejas y no están totalmente definidas, la deslignificación supone la degradación de la macromolécula de



lignina y formación de grupos que hacen más soluble en álcali, esta se debe exclusivamente a las reacciones de carácter nucleofílico. Los reactivos utilizados en tales procesos ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{HSO}_3^-$ ) actúan como agentes nucleófilos que producen la rotura de ciertos tipos de enlaces éter. [9]

El proceso al sulfato, o Kraft, es el proceso de fabricación de pasta más empleado en el mundo. En el al 95 % de las pastas químicas se fabrican mediante este proceso. La posibilidad de trabajar con cualquier especie forestal y la capacidad para recuperar los reactivos y de obtener, de la materia orgánica disuelta en las lejías negras, la energía que abastece el proceso, son las claves de este éxito.

### **7.1.1 El proceso Kraft**

Consiste en una cocción de las astillas con un licor constituido por hidróxido sódico y sulfuro sódico, a temperaturas próximas a los 170 °C y durante periodos que variarán, según la especie, entre 1.5 y 3 horas. Produce pastas con propiedades mecánicas elevadas pero oscuras y difíciles de blanquear. La des lignificación va acompañada de disolución de hidratos de carbono, lo que supone rendimientos cercanos al 50 % en pulpa. Las pulpas obtenidas mediante este proceso presentan índices Kappa (indicativo de la cantidad de lignina residual en la pasta) entre 15 unidades Kappa para especies frondosas y 30 unidades Kappa para las especies coníferas. La cocción Kraft prolongada y la des lignificación posterior con oxígeno, son algunas opciones para reducir aún más la índice Kappa.[8]



### **7.1.2 El proceso a la sosa**

Antecesor del proceso Kraft, es similar en muchos aspectos, como en la recuperación de reactivos y energía, pero las pastas obtenidas tienen menor resistencia mecánica, consecuencia de una deslignificación menos selectiva que la que tiene lugar en el proceso Kraft.

### **7.1.3 Procesos ácidos**

El licor de la cocción está compuesto por una disolución de bisulfito, que puede ser cálcico, sódico, amónico o magnésico, y anhídrido sulfuroso. La temperatura de la cocción varía entre 120 y 150 °C y su duración entre 8 y 12 horas. Este proceso es relativamente poco empleado debido a la dificultad que presenta en la recuperación de reactivos y en las limitaciones para el uso de la materia prima. Las características mecánicas de estas pastas son inferiores a las de las pastas al sulfato. No obstante, presentan una blancura y una aptitud para el blanqueo superior a las de las pastas Kraft, siendo más fácil eliminar la lignina y las hemicelulosas residuales. Se emplea para obtener papeles de impresión o como materia prima para producir derivados de celulosa.

## **7.2 Procesos de fabricación de pulpas mecánicas o de alto rendimiento**

El objetivo de los tratamientos mecánicos en la madera es la transformación de la materia prima en fibras papeleras, sin pérdida excesiva de rendimiento. Al contrario que en los procesos químicos, la lignina no es extraída, es reblandecida para facilitar el desfibrado y, en algunos casos, se modifica mediante un pre tratamiento químico suave que facilita la posterior separación mecánica de las fibras. Existe una gran variedad de procesos mecánicos de fabricación de pulpa y numerosas denominaciones y clasificaciones de las pulpas que tienen en cuenta diferentes aspectos del proceso, como el tipo de desfibrador (pulpas de muela y pulpas de refinador), la



presión en el desfibrado (pulpas termo y pulpas desfibradas a presión atmosférica) o la impregnación química antes del desfibrado (pulpas químicas). [9]

### **7.2.1 Procesos mecánicos sin pre tratamiento químico**

Este método de elaboración de pulpas, surgió aproximadamente en 1840, es el más antiguo. En las pastas mecánicas clásicas, los troncos de madera, previamente descortezados, se someten a la acción de una muela en rotación, con una superficie abrasiva, rugosa, que desprende las fibras de la superficie del tronco. Las fibras están sometidas a fuerzas de compresión cuando el grano de la muela pasa sobre ellas. Además, el roce con la muela genera calor y llegan a alcanzarse temperaturas elevadas que reblandecen la lignina y favorecen la separación de las fibras. Para evitar un gran aumento de temperatura, la muela se rocía con agua. Las pulpas obtenidas reciben el nombre de pulpas de muela y son conocidas por sus siglas en inglés SGW (stone groundwood). Este proceso puede llevarse a cabo a presión atmosférica o bajo presión (PSGW). [9][17]

El inconveniente que presenta es el deterioro excesivo de la pared de las fibras, por lo que no es recomendable su uso en especies frondosas cuyas fibras son, en su mayor parte, de paredes finas.

### **7.2.2 Procesos mecánicos con pre tratamiento químico**

Si antes del tratamiento mecánico, se lleva a cabo un pre tratamiento químico suave de las astillas, las pulpas reciben el nombre de pulpas químico termo mecánicas (QTMP) o pulpas químico-mecánicas de refino (QRMT) en función de que sean una variante de los procesos Pulpa termomecánica (TMP) o pulpa mecánica de refino (RMP), respectivamente.



*Pulpas termo mecánicas (TMP)* En este método de producción, los troncos se cortan en astillas. Las astillas son lavadas para eliminar cualquier resto de arena o polvo que pudiera desgastar o desgarrar la maquinaria. Seguidamente, las astillas se calientan mediante vapor para ablandarlas y son introducidas con agua a presión en el refinador. El refinador consta de dos discos de contra rotación, ambos con canales radiales desde el centro hasta el borde exterior. Los mencionados canales van estrechándose conforme se aproximan al borde del disco. Las astillas reblandecidas son introducidas entonces por el centro y, gracias a la acción de los discos, se separan en fibras individuales al alcanzar el borde exterior de éstos. Las fibras no desprendidas completamente se desechan en la etapa de cribado, enviándose al refinador de desechos para su posterior tratamiento. [9][17]

El fundamento de la obtención de estas pulpas se relaciona con el comportamiento de la madera en las condiciones de trabajo. En estado natural, la madera, a temperaturas superiores a 20 °C y en estado húmedo, presenta las hemicelulosas y la celulosa amorfa reblandecida.

A temperaturas dentro del intervalo 130-140 °C, la lignina, exenta de humedad, experimenta la transición desde un estado vítreo a un estado elástico. Esta temperatura se conoce como temperatura de transición vítrea (TTV) y su valor depende, en gran medida, del contenido en humedad, de forma que a medida que la madera se satura de agua, el valor de la TTV disminuye. La composición química de la lignina también afecta a la TTV, siendo ésta menor en maderas frondosas que en maderas coníferas. Debido al mayor grado de entrecruzamiento de la estructura de la lignina en las coníferas, formada casi exclusivamente por unidades guayacilpropano, su estructura es más rígida, lo que dificulta los desplazamientos de moléculas que se producen cuando se alcanza la TTV. El descenso de la TTV en la lignina depende de su



capacidad de hidratación y ésta, a su vez, de lo hidrófila que sea la lignina. Por ello, los tratamientos químicos que se aplican a la madera tienen por objeto modificar la lignina para aumentar su hidrofilia y, consecuentemente, su capacidad de retención de agua. Como consecuencia de esta disminución de la TTV, se logra un importante descenso en el consumo de energía en el desfibrado y refino.

Los procesos de obtención de estas pulpas se inician con un descortezado y astillado de la madera, seguidos opcionalmente, de tratamiento con vapor de las astillas para expulsar el aire de su interior e incorporar agua que favorezca la difusión de los reactivos químicos. Se realiza entonces la impregnación, que va seguida del desfibrado en refinador de discos (a presión o atmosférico) y posterior refinado atmosférico de la pulpa. [8][9][16]

Los pre tratamientos químicos conllevan tiempos cortos y concentraciones de reactivos (como  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  y  $\text{NaOH}$ ), comparativamente bajas que evitan la solubilización de los componentes mayoritarios de la madera y el consiguiente descenso en el rendimiento y en la opacidad. El beneficio de la impregnación es que, tras el tratamiento mecánico, las fibras individualizadas son más flexibles y las pastas tienen menor proporción de finos y de haces de fibras que las pastas RMP o TMP. Esto prueba que el desfibrado ha sido de mayor calidad y se traduce en mejores características físicas, aunque con rendimientos ligeramente inferiores.

Las principales ventajas de estas pastas mecánicas, frente a otras pastas, son la posibilidad de uso de especies frondosas y mayor resistencia mecánica. Son, además, fácilmente blanqueables, con buena y alta opacidad, por la existencia de finos y de zonas cristalinas de celulosa. Por su alta porosidad, tienen buena absorción de tintas y se emplean para hacer papel prensa y el resto de papeles de impresión y escritura. Sin embargo, estas pastas también tienen





una serie de inconvenientes, como la poca estabilidad de color y la tendencia al amarillamiento, un consumo de energía elevado y el uso de compuestos de azufre en las etapas químicas de impregnación, con los consecuentes problemas de contaminación y corrosión de instalaciones.

Dentro de los procedimientos de obtención de pulpas QTMP y QRMP, puede haber varios tipos de procesos atendiendo a los reactivos químicos empleados: proceso a la sosa en frío, proceso al sulfito neutro, al sulfito alcalino, y procesos álcali peróxido.

### **7.2.3 El proceso a la sosa en frío (CCS, cold caustic soda)**

Este proceso es el más antiguo de los procesos mecánico-químicos que consiste en remojar las astillas de madera en una solución de hidróxido de sodio a bajas temperaturas antes del desfibrador. El término “en frío” indica que la impregnación de las astillas con los reactivos se realiza a temperaturas que oscilan entre 20 y 95 °C. La deslignificación comienza a temperaturas superiores a 100 °C. Las astillas se impregnan en una solución de NaOH (entre 25 a 40 g/L) durante 2-3 horas y posteriormente son tratadas mecánicamente en el desfibrador de discos.

En este proceso, los polisacáridos interactúan con los iones OH<sup>-</sup>, produciéndose reacciones de hidrólisis [9]. Se produce entonces el debilitamiento de los enlaces interfibrilares por la separación de los grupos acetilos ligados a la porción poliurónica de las hemicelulosas en la laminilla media, ocasionando un aumento en la capacidad de hidratación de la pared celular, el hinchamiento de las fibras y el aumento de permeabilidad, lo que favorece la transferencia de los reactivos. Este proceso permite reducir la energía necesaria para la transformación de la pasta. Debido al mayor contenido en hemicelulosas y celulosa en las especies frondosas respecto a las coníferas, la impregnación de las primeras se realiza con mayores cantidades de álcali, para



aprovechar así el hinchamiento de las fibras y favorecer el desfibrado. El debilitamiento de los enlaces es más pronunciado a medida que se aumenta la temperatura de la impregnación y va acompañado de un aumento en la solubilización de las hemicelulosas y de la lignina. Este es el motivo por el que este proceso, que se emplea sobre todo con vegetales anuales, se realiza a baja temperatura, para limitar las pérdidas de rendimiento y de opacidad. Las pastas que se obtienen presentan resistencias mecánicas elevadas y baja blancura.

#### **7.2.4 Procesos al sulfito neutro,**

Son los procesos representativos de las pulpas semiquímicas en donde el licor de cocción ataca principalmente a la lignina.

En este proceso, se adiciona el licor de impregnación formado por  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (sulfito de sodio) con un pH inicial neutro. Durante la impregnación, a temperaturas ligeramente superiores a  $100^\circ\text{C}$ , tiene lugar la formación de ácidos orgánicos debido a la acción del sulfito, que produce la extracción de los ácidos presentes en la madera, la hidrólisis de las hemicelulosas y la oxidación de los grupos carbonilos de los hidratos de carbono. Se produce una disminución del pH del medio, que provoca la hidrólisis de los hidratos de carbono y la consecuente pérdida de rendimiento. Para amortiguar las variaciones del pH y mantenerlo neutro durante la cocción se adiciona  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .

Durante este proceso se produce la sulfonación de la lignina por los iones  $\text{HSO}_3^-$  formados a partir del  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . El ataque de estos iones, más activo en los grupos bencil alcohol y bencil éter, hace que los oxígenos sean sustituidos por los grupos sulfonatos, altamente polares, dando lugar a los lignosulfonatos. La sulfonación está acompañada de la liberación de grupos fenólicos. Ambos fenómenos contribuyen a hacer más hidrófila la lignina y causan la disolución parcial de



la laminilla media y el debilitamiento de las uniones entre fibras que favorece el desfibrado y reduce el contenido en finos y en rechazos de la pasta [9]. La extensión de estos fenómenos debe de estar controlada para limitar en lo posible la pérdida de rendimiento y de opacidad. Para aprovechar el mayor contenido en lignina de las especies coníferas, las concentraciones de sulfito empleadas son superiores a las empleadas con especies frondosas. Las resistencias mecánicas de estas pastas son inferiores a las obtenidas por el proceso a la sosa en frío, aunque la blancura es sensiblemente superior.

Para disminuir las pérdidas de rendimiento provocadas por el descenso en el pH, se añade una concentración de hidróxido sódico suficiente para neutralizar los ácidos que se forman durante la impregnación, surge así el proceso al sulfito alcalino. En él se combinan los efectos del NaOH y del Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> sobre la celulosa y la lignina, respectivamente, consiguiendo pastas con buenas resistencias mecánicas, alta blancura y bajo contenido en rechazos, que pueden emplearse en papeles de impresión escritura sin que sea preciso añadir pasta química de refuerzo. Se usan también en productos absorbentes, donde, a diferencia de las pastas termo mecánicas, sus propiedades se mantienen con el tiempo. Durante la impregnación, el grado de sulfonación de la madera depende de la especie que se emplee y como regla general en las especies frondosas la sulfonación ha de ser más suave que en las coníferas, debido a la menor TTV de la lignina de frondosas y al menor contenido en lignina de éstas. La velocidad de sulfonación aumenta con la temperatura de operación, con lo que la TTV se reduce más rápidamente. Cuando la sulfonación tiene lugar a pH dentro del intervalo de 4 a 10, la TTV de la lignina sulfonada permanece constante. Si el pH se eleva hasta 12 (proceso sosa-sulfito) se produce un brusco descenso, que se ha relacionado con la disociación de los grupos hidroxilo fenólicos que tiene lugar a un pH



próximo a 10. A valores superiores a 13.5 se registra un aumento de la TTV respecto al valor correspondiente a la madera original, que se ha relacionado con la aparición de reacciones de condensación similares a las que tienen lugar en la cocción al sulfato. Esto supone que el pH para una adecuada sulfonación se fije en valore próximos a 12. Se ha observado que los efectos de la temperatura y del pH son similares en maderas de especies frondosas y coníferas.[9]

Por tanto, al eliminar la lignina, el rendimiento del volumen de madera disminuye su porcentaje de acuerdo al proceso utilizado para la obtención de pasta, siendo este un parámetro que permita la elección del proceso a emplear. (Diagrama 3.0)

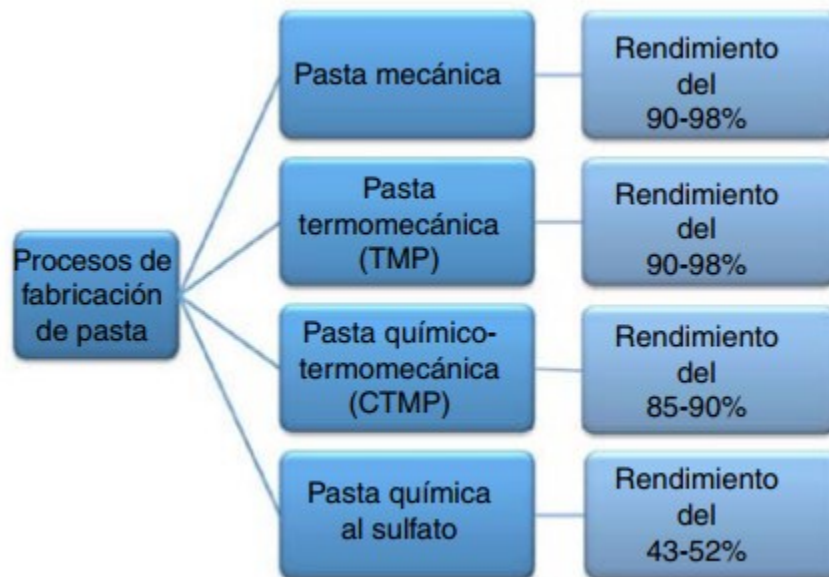


Diagrama 3.0 Rendimiento de los diferentes procesos de fabricación de pasta [8]



### **7.3 Propuesta para la obtención de pulpa celulósica a partir del tallo de maíz**

Posterior a un análisis de los distintos procesos de obtención llevados a cabo a nivel industrial para la producción de papel y tomando en cuenta el empleo como fuente de fibra el tallo de maíz, debido a sus características morfológicas, fisiológicas, fenológicas y de composición química mencionados en capítulos anteriores, se propone al proceso semiquímico alcalino a la sosa en frío, para la producción de pulpa para papel en donde el desarrollo de este proceso se describirá más adelante.

Por otra parte es importante mencionar que el tallo de maíz tiene una capa externa fibrosa que aporta la mayor parte de la fibra celulósica y una médula interna que consiste principalmente en haces vasculares que transportan los líquidos dentro de la planta; esta médula aporta las características de opacidad en el papel.

La parte interna de la planta de maíz consiste en una masa medular compuesta principalmente de tejido celular, libre de savia y otras impurezas; este material proporciona una fuente pura de celulosa natural.

### **7.4 Diagrama del proceso para obtención de papel de tallo de maíz**

A continuación se muestra el diagrama del proceso propuesto para la utilización de fibra de tallo de maíz y posteriormente se describe cada una de las etapas necesarias para producir la pulpa para papel a partir de esta fibra, además se propone que este proceso se lleve a cabo a nivel planta piloto y de dar resultados positivos, poder efectuarlo a mayor escala.

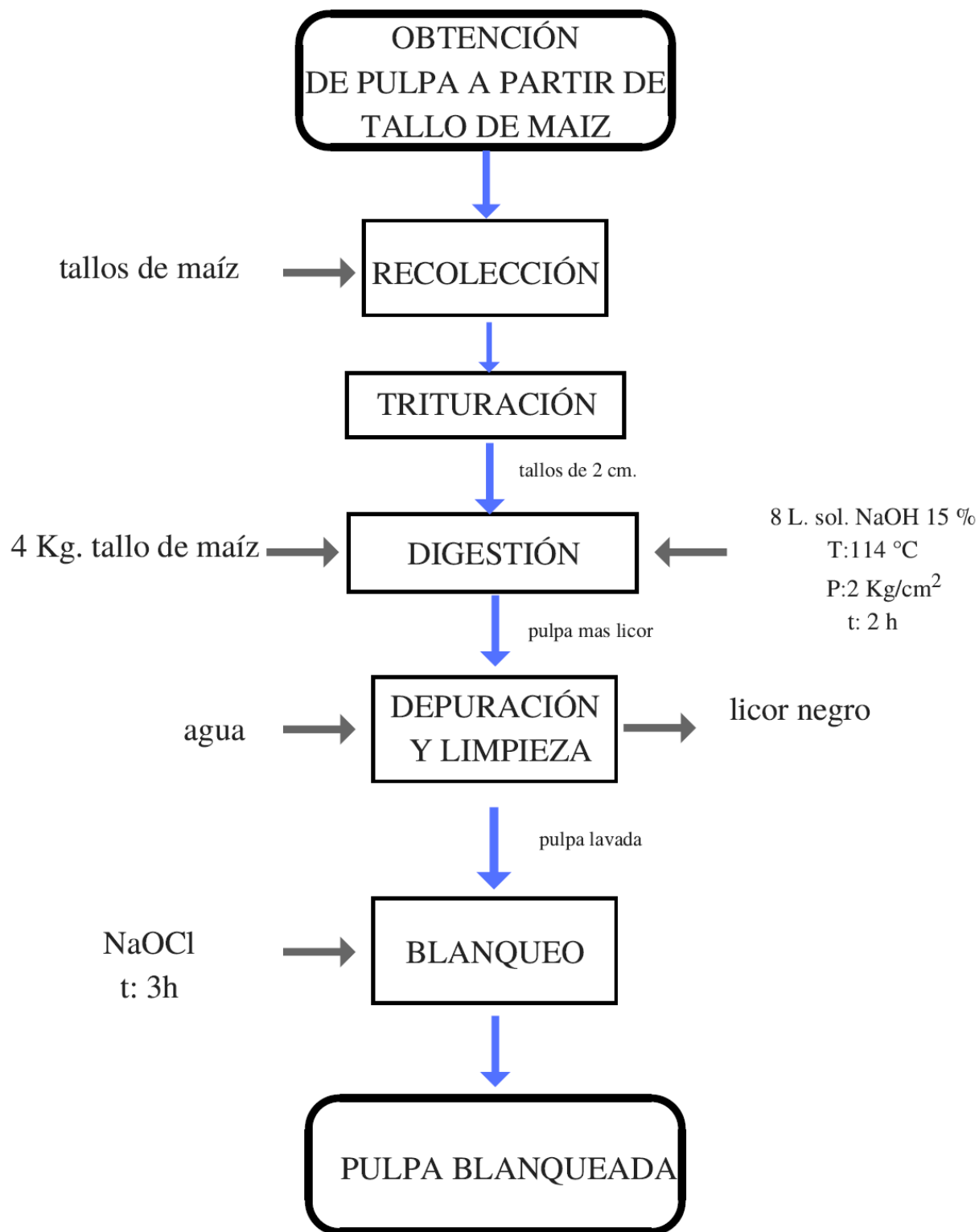


Diagrama 4.0 Obtención de pulpa para papel a partir de fibra de tallo de maíz [24]

## 7.5 Obtención de pulpa a partir de tallo de maíz

Desde la selección de la materia prima hasta el proceso de secado del papel, intervienen diferentes variables que pueden afectar las características y propiedades del producto final, en cada etapa se mencionan las condiciones de estas variables que deben ser medidas y controladas para lograr un resultado óptimo.

### 7.5.1 Recolección del tallo de maíz

La recolección del maíz sucede cuando la planta se encuentra con una humedad máxima de entre 22 % a 24 %, este contenido de humedad existe cuando la mazorca se desgrana con facilidad.



**Figura 10.0 Agricultor corroborando el estado de maíz para cosechar [33]**

Otra característica que define el inicio de la recolección es cuando las espigas están secas [33].



Una vez que los agricultores han recolectado las mazorcas de maíz, se centra la atención en la recolección de los residuos de la cosecha: el tallo.



**Figura 11.0 Desechos de la cosecha de maíz [33]**

### **7.5.2 Trituración**

La planta de maíz (*Zea mays*) forma un tallo erguido y fuerte, cuya altura oscila entre 60 centímetros y hasta 6 metros o más; la media es de 2.4 metros, por tanto es importante la reducción de tamaño de los mismo por medio de un triturado o astillado proveniente de una planta de cortado. Se sugiere cortar la materia prima en pequeños trozos de 1 a 2 cm. con la finalidad de obtener un tamaño adecuado de fibra, esto beneficiará la interacción licor de digestión (cocción)-fibra; así como la cantidad y la calidad de unión interfibrilar durante la formación de las hojas de papel, así, la transformación de pulpa se logra mediante el control de estas operaciones: el triturado, el astillado y el tamizado.





**Figura 12.0 Triturado de tallos de maíz**

### 7.5.3 Digestión

Al elaborarse la pulpa, los enlaces dentro de la estructura del tallo se rompen químicamente. La pulpa será producida en medio alcalino (proceso a la sosa en frío).

Su punto de partida está en el procedimiento a la sosa (que utiliza únicamente hidróxido de sodio NaOH para la digestión). En el empleo de este proceso, la lignina que une la celulosa a la hemicelulosa no se disuelve, simplemente se ablanda, con lo cual se separan éstas sin dañarse de forma sustancial, permitiendo que las fibras se asienten fuera de la estructura del tallo. Los rendimientos (proporción de la fibra inicial en la pulpa) son normalmente del 40 % al 55 % porque eliminan más cantidad de materiales no celulósicos. (Ver diagrama 3.0).



**Figura 13.0 Digestor de acero inoxidable**

El procedimiento implica la digestión-cocción de las astillas y los reactivos en solución acuosa en un reactor o digestor de acero inoxidable, la mezcla de digestión es hidróxido de sodio



(NaOH) en una solución al 15 % (entre 20 y 60 g/L). El digestor se carga de astillas (3 a 4 Kg) y de licor de cocción (8 litros de licor blanco), manteniendo la digestión a una temperatura entre 114 °C y una presión de 2 Kg/cm<sup>2</sup> se mantiene a ese nivel durante 1 ó 2 horas. Una vez completada la digestión, la pulpa se envía a la etapa de desfibrado.

#### **7.5.4 Desfibrado**

Una vez que se termina la digestión, se procede a separar la materia prima del licor de cocción y llevar a cabo el lavado de esta, quedando libre de cualquier resto de licor, para realizar esta operación se emplean medios filtrantes para separar los trozos de tallo de maíz digeridos del licor de cocción obtenido y efectuando al final un lavado de la pulpa.

Hoy día, en muchas de las operaciones de preparación de pulpa, los residuos químicos son tratados para minorar el efecto ambiental por lo tanto el licor obtenido del digestor de la planta piloto se neutraliza logrando obtener un pH= 7 y poder eliminarlos al drenaje.

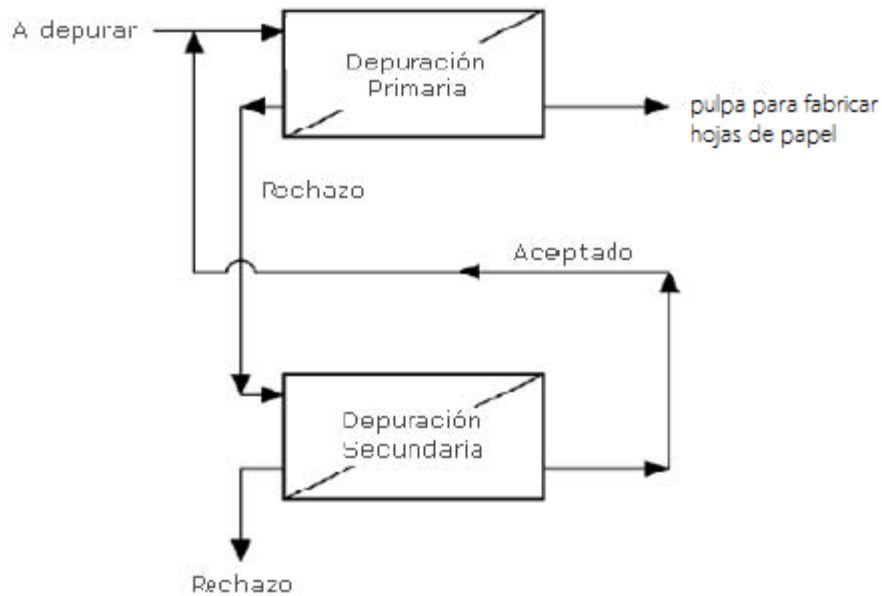
Es necesaria la desintegración mecánica de los trozos del tallo de maíz de las para formar una pulpa, cuya apariencia sea semejante a la del algodón cuando esta mojado. La forma para llevar a cabo esta función mecánica se efectuaría mediante el uso de una licuadora, que provoca la separación parcial de las fibras, obteniéndose una pulpa más fuerte y oscura.



**Figura 14.0 Pulpa obscura después del proceso de desfibrado [38]**

### **7.5.5 Depuración y limpieza**

Es necesario llevar un control de los elementos que pasan a formar parte de la hoja, este control se lleva a cabo mediante sistemas de depuración que pretenden separar las fibras de todas aquellas partículas no deseadas que perjudican el papel, el objetivo principal de la depuración es obtener un papel limpio sin manchas además de evitar roturas y desgastes en la fabricación. El aparato utilizado para esta operación se llama depurador.



**Figura 15.0 Depuración de pulpa [17]**

Se muestra un esquema de del recorrido que hace la pulpa durante la depuración, antes de pasar a la etapa de fabricación. La pulpa (llamada “parda”, por su color) se tamiza para separar los trozos de fibra que hayan quedado sin digerir, se lava para separar la mezcla de cocción utilizada (ahora licor negro) las trazas de licor de cocción resultantes junto con el licor de cocción agotado se neutralizan con ácido clorhídrico (HCl) 1M para su posterior eliminación.

### **7.5.6 Blanqueo**

El blanqueo es un proceso dirigido en varias etapas mediante el cual se refina y aclara la pasta de tallo de maíz en bruto. El objetivo es disolver (pasta química) la lignina parda que no se eliminó durante los procesos de elaboración de la pasta, manteniendo la integridad de las fibras ocurre una reacción química entre los componentes cromofóricos de la lignina presente en la fibra de tallo de maíz. La producción va variando el orden, la concentración y el tiempo de reacción de los agentes blanqueadores.



Cada etapa del blanqueo se define por su agente blanqueador, el pH (acidez), la temperatura y la duración (Tabla 4.0). Después de cada una de ellas, la pulpa se debe lavar con agentes cáusticos para eliminar los agentes blanqueadores y disolver la lignina antes de pasar a la siguiente etapa. Finalizada la última etapa, la pulpa se pasa a través de series de tamices y limpiadores para eliminar cualquier contaminante, como basura o plásticos, entonces se concentra y transporta al almacenamiento.

**Tabla 4.0 Agentes blanqueadores y condiciones para su empleo [23]**

Agente blanqueador	Símbolo	Concentración del agente %	pH	Consistencia %	Temperatura °C	tiempo h
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	C	2.5-8	2	3	20-60	0.5-1.5
Hidróxido sódico (NaOH)	E	1.5-4.2	11	10.0-12	<80	1.0-2
Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	D	1	0-6	10.0-12	60-75	2.0-5
Hipoclorito sódico (NaOCl)	H	1-2	9.0-11	10.0-12	30-50	0.5-3
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	O	1.2-1.9	7.0-8	25-33	90-130	0.3-1
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	P	0.25	10	12	35-80	4
Ozono (O <sub>3</sub> )	Z	0.5-3.5	2.0-3	35-55	20-40	<0.1
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	A	4.0-6	1.8-5	1.5	30-50	0.25
Ditiosulfato sódico (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	Y	1.0-2	5.5-8	4.0-8	60-65	1.0-2

Tradicionalmente se utiliza gas cloro, por su eficacia en separar la lignina selectivamente conservando las fibras de celulosa prácticamente intactas.

Otros compuestos que han sustituido al cloro han sido dióxido de cloro e hipoclorito sódico, Para este proceso, sugerimos la utilización de hipoclorito de sodio en un tiempo de 3 horas. Siendo el agente más utilizado, puesto que separa eficazmente la lignina dejando las fibras de celulosa prácticamente intactas.



## **7.6 Formación de las hojas a partir de pulpa celulósica de tallo de maíz**

En esta fase, las operaciones que se realizan, determinan las propiedades físicas más importantes del papel, de la misma manera que en capítulo anterior, se detallan las etapas mencionando las variables que se deben controlar para lograr las características esperadas según los requerimientos, algunas de estas características son:

1. Blancura
2. Brillo
3. Tipos de resistencia
4. Opacidad
5. Densidad
6. Fibras
7. Encolado
8. Grano
9. Deterioro

Debido a la cantidad de etapas para elaboración de papel y sobre todo a la gran variedad de tipos de papel, resulta complicado describir las propiedades características de una hoja de papel.

La mayoría de las propiedades que definen un producto exitoso no posee valores absolutos sino más bien subjetivos.



Una vez que se tiene la pulpa, se prepara para una mezcla de cargas y aditivos, las siguientes fases del diagrama de proceso (5.0) son básicamente iguales para cualquier tipo de papel.

A partir de aquí se trata de transformar pulpa diluida en una lámina delgada, ancha y uniforme con todos los componentes perfectamente distribuidos.



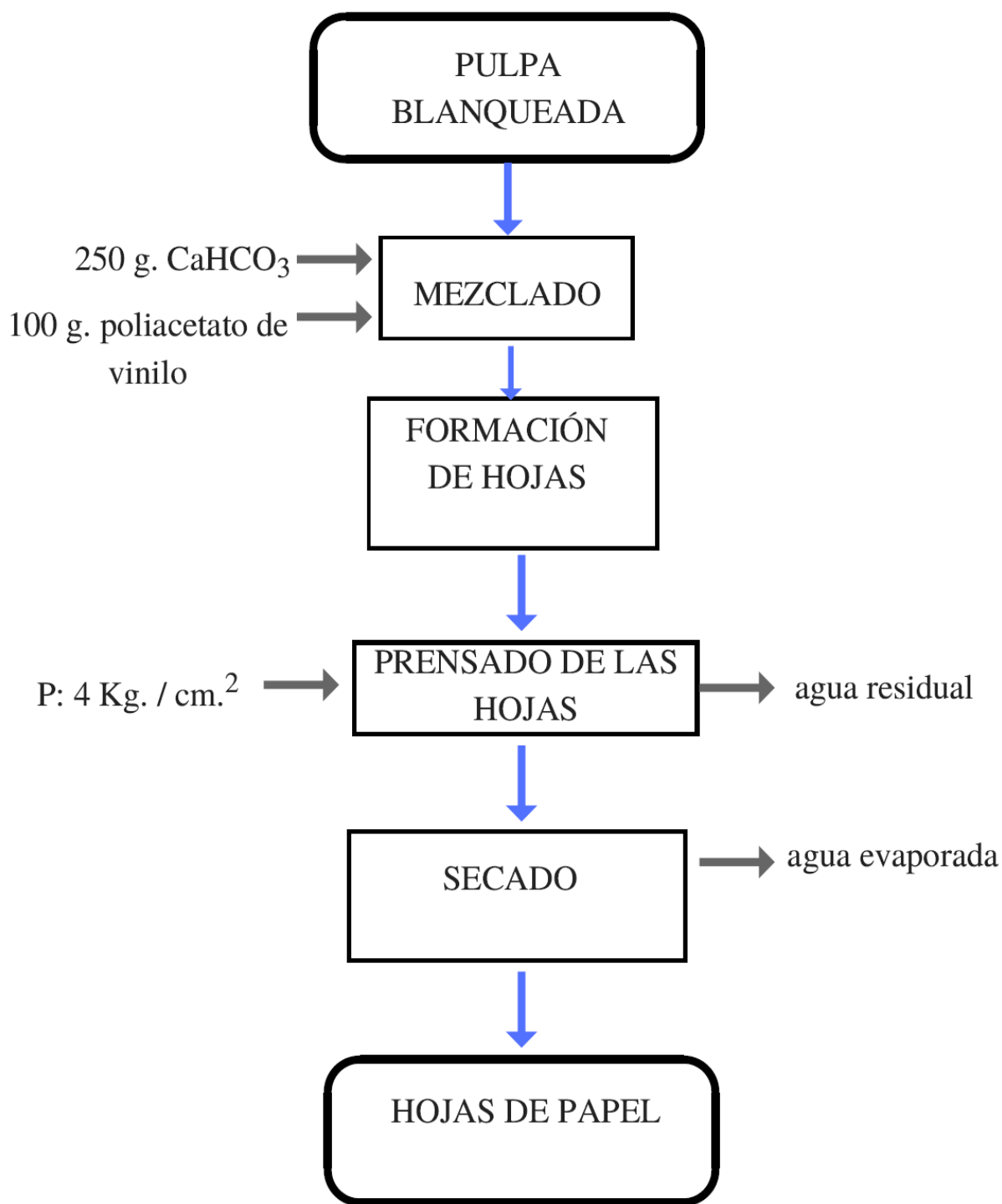


Diagrama 5.0 Elaboración de hojas de papel a partir de pulpa obtenida de fibra de tallo de maiz [24]





### **7.6.1 Mezclado: adición de cargas y aditivos**

En la composición de la pulpa de tallo de maíz se añadirán productos químicos no fibrosos denominados cargas y aditivos. Los mismos tienen como objetivo dar o reforzar ciertas propiedades específicas que necesita tener el papel según requiera su utilización futura.

Entre las cargas se destacan el caolín, el talco, el carbonato de calcio y el dióxido de titanio. Son partículas minerales blancas y finas que tienen como premisa mejorar las propiedades físicas, ópticas y de impresión del papel, rellenan espacios entre fibras logrando una hoja más densa, blanca, lisa y opaca. Los papeles cargados contienen alrededor de 10 % de su peso en cargas.

Entre los aditivos podemos mencionar los agentes de encolado cuyo objetivo es dar al papel resistencia a la penetración de fluidos (resinas colofonias o sintéticas), adhesivos de resistencia en seco (almidones, gomas) que ayudan a incrementar la resistencia del papel a la tracción y al desprendimiento, resinas de resistencia en húmedo (urea-formaldehído, melanina-formaldehído y poliamidas) que otorgan al papel mayor resistencia cuando se humedece, materiales colorantes (pigmentos), ayudantes de retención para mejorar la permanencia de finos y cargas, desfloculantes de fibras para mejorar la formación (evitando el marmolado), antiespumantes (mejoran desagote en máquina), ayudantes de desagote, blanqueadores ópticos (mejoran la blancura aparente absorbiendo ondas UV y reflectando más las ondas azules), controlantes de tono (resina de la madera que si se acumula en máquina puede producir inconvenientes) y microbicidas (evitan la formación de hongos y bacterias).



Suelen añadirse también ácidos y bases y alúmina para el control del pH y el fijado de los aditivos. Junto con estos aditivos, se incorporan otros constituyentes (cargas) que cabe incluirlos por su proporción respecto a las fibras celulósicas dentro de las materias primas.

Se utiliza 250 g. de Carbonato de Calcio ( $\text{CaHCO}_3$ ) y 100 g resina de poliacetato de vinilo (pegamento blanco).

### **7.6.2 Formación de las hojas**

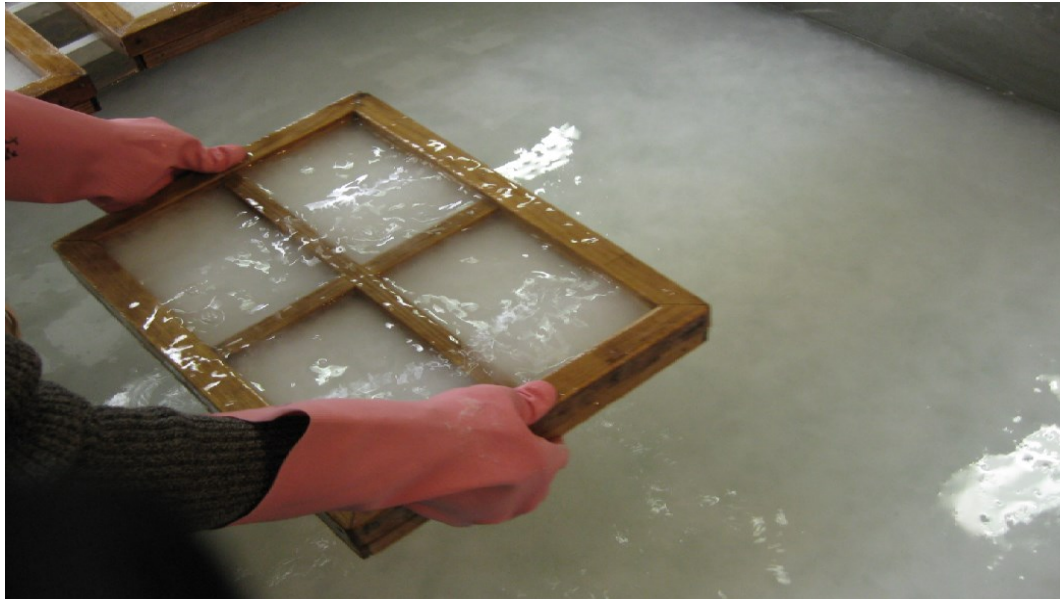
Ya obtenida la pulpa blanqueada, se fabricarán hojas de papel. Para la formación de la hoja, existen múltiples modelos de distribuidores de pulpa de papel, para conseguir una distribución uniforme sobre la cinta continua de tela, que forma la hoja de papel, entonces se adiciona una cantidad determinada de pulpa y agua, y con el uso de un molde y un bastidor se obtendrán las hojas de papel. La consistencia de la pulpa al momento de la formación es una variable crítica y debe estar controlada de una manera estricta +/- 1 % de variación máximo. La cantidad de pulpa depositada, es una variable crítica que define el espesor de papel.

A continuación, se describe de forma general la metodología que se sugiere para la formación de las hojas de papel a partir de la pulpa celulósica preparada.

La pulpa preparada se deposita en una tina, luego se le adiciona agua para generar una suspensión acuosa y con ello favorecer la formación de cada hoja de papel. Esto beneficia la uniformidad relativa de la dispersión de las fibras dentro del bastidor, porque permite controlar la velocidad de formación.



Preparada la suspensión, se introduce un bastidor; procurando que cierta cantidad de pulpa celulósica quede dentro del mismo.



**Figura 16.0 Formación de hojas de papel utilizando bastidores [38]**

La cantidad de pulpa utilizada para la formación de la hoja de papel queda determinada en función del espesor deseado para formar una hoja de papel.

Para lograr la formación de la hoja a partir de la cantidad de pulpa vertida dentro del bastidor, se emplean movimientos lentos orientados en dirección norte-sur y después en dirección este-oeste que beneficiaron la dispersión, orientación y grado de compactación de las fibras celulósicas a través del bastidor para lograr la formación de una red fibrosa, que define finalmente una hoja de papel

Ya formada la hoja de papel, el bastidor sale de la suspensión acuosa y se mantiene elevado por encima de ésta, después se coloca un fieltro o un pellón encima de la hoja formada para drenar el exceso de agua, Después se toma el bastidor y se levantó a una altura aproximada de 1.85 m para observar a contra luz la hoja formada, si la hoja observada contiene una mala



dispersión de las fibras que permitan la formación de huecos en la hoja de papel; se deshace y la pasta se regresa a la suspensión para formar una nueva hoja [21].

### **7.6.3 Prensado**

El papel necesita eliminar el resto del agua que contiene, esto se lleva a cabo en la etapa de prensado. La hoja de papel, al entrar en la sección de prensas, tiene una consistencia aproximada de un 20 %, es decir, contiene un 80 % de agua. Al final de la operación de prensado quedará, con un 60 % de agua. En este proceso, la hoja es transportada a través de unos rodillos o prensas caseras que la presionan, los cuales consiguen extraer hasta un 20 % más del agua y, a la vez, le dan al papel unas condiciones superficiales y de resistencia favorables para su posterior utilización. La hoja es transportada a través de una serie de prensas donde se elimina gran parte del agua y se consolida la hoja (las fibras son forzadas a un contacto íntimo) para facilitar la operación de secado. El prensado húmedo se realiza haciendo pasar la hoja, en contacto con un fieltro, entre dos rodillos.

Las principales variables que afectan el funcionamiento de las prensas se enlistan a continuación:

- Tipo de prensa y configuración.
- Presión en la zona de prensado: a medida que aumenta la velocidad de las máquinas la presión va en aumento también.
- Humedad de la hoja a la entrada de la prensa: un papel más seco soportará mayores presiones mientras que uno húmedo reventaría.
- Humedad del fieltro: cuanto más seco está el fieltro más tarda en saturarse y más agua es capaz de filtrar.



- Tipos de fieltro y conservación: mantener el fieltro en buenas condiciones favorece mucho la sequedad del papel además con ello se controla la presencia de franjas húmedas a lo ancho del papel.

Para llevar a cabo el prensado en las hojas obtenidas a partir del tallo de maíz, son sometidas a prensas compuestas de dos superficies planas de madera y dos placas metálicas con tornillos que presionan a las planchas de madera encontrándose las hojas en el interior de ellas como si fuera un emparedado.



Figura 17.0 Prensa mecánica sencilla [38]

Aquellos papeles que requieren un elevado acabado superficial, pasan por una operación denominada calandrado; con esta operación se pretende mejorar principalmente el brillo y propiedades de impresión, un papel bien comprimido puede cumplir con el gramaje especificado, pero no con el espesor, así que la presión debe ser tan alta que permita satinar de manera correcta el papel, pero tan moderada que permita cumplir con el espesor requerido, de 4 a 5 Kg / cm<sup>2</sup> pueden ser adecuados. Por otra parte, se sabe que un buen satinado del papel determinará una buena calidad de impresión en el producto final, esto se logra controlando el nivel de compresión y el gramaje.

#### 7.6.4 Secado

Después del prensado, la hoja se extrae con una espátula y se desplaza con mucho cuidado. Es importante mencionar que esta última acción resulta relevante, porque el desplazamiento en



algunos casos provoca el rompimiento de la unión y el grado de compactación de las fibras celulósicas.

Una vez realizada la extracción de las hojas, procedemos a la etapa de secado, que consiste en la reducción del contenido de agua (almacenada de forma capilar en la estructura interna de las hojas) hasta quedar aproximadamente con un 5 % de humedad, puede ser mediante distintos procesos, sugerimos en particular un proceso de evaporación; integrado por la exposición de las hojas a la radiación solar adicionando un peso para evitar la deformación.

Con una duración aproximada de dos días. Una vez secas las hojas de papel se almacenan.



**Figura 18.0 Hojas de papel formadas [38]**



## CONCLUSIONES

México posee un gran potencial para la producción de maíz, 24 694 miles de toneladas anuales, los restos orgánicos de la cosecha de maíz son utilizados en distintas formas, ya sea como forraje o la elaboración de abono de suelos entre otras actividades benéficas para el ser humano y el medio ambiente además de que influyen directamente en la producción, por lo que es muy importante mantener un equilibrio entre la eliminación de residuos de la cosecha y el ecosistema.

El Ingeniero Químico puede participar en proyectos de esta índole aplicando los diversos conocimientos adquiridos durante el desarrollo de su carrera, ante la necesidad de contribuir con la conservación del medio ambiente específicamente en la tala de árboles, la tesis realizada demuestra gran beneficio y las oportunidades que tenemos para aprovechar estos residuos ya que ofrecemos una fuente de fibra natural para obtener celulosa y disminuir la deforestación.

Implementando un proyecto de esta índole, el beneficio hacia la población sería variado, desde fortalecer el desarrollo y la utilidad del tallo de maíz, hasta permitir la participación de pequeños y medianos productores en el programa de producción, de esta manera se crearían nuevos puestos de trabajo de forma directa e indirecta.

Es necesario respaldar este conocimiento teórico por una práctica directa, para enriquecer este estudio con experiencias posteriores. Los resultados obtenidos permitirían su aplicación en los diversos sectores económicos, así como de complemento en otros niveles de enseñanza para distintas materias de aprendizaje.



## BIBLIOGRAFÍA

- [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 y papel*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, recuperado de: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR07/silvio.pdf>
- [2] Benz, B. F. (1997). *Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano*. *Arqueología mexicana*. recuperado de: <http://arqueologiamexicana.mx/ediciones-regulares/25-el-maiz>
- [3] Caballero A., Daza D., González D., & Martínez C., (2016). *Valuación de las propiedades físicas y químicas de residuos sólidos orgánicos a emplearse en la elaboración de papel* Universidad de Caldas revista. Luna. Azul ISSN 1909-2474 No. 43, julio - diciembre 2016. *Madera y Bosques*, recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n43/n43a21.pdf>
- [4] Calle N. (2014) *Elaboración de papel a partir de fibras vegetales no maderables (pizonte de plátano) Proyecto de investigación científica, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Bolivia* recuperado de: <http://www.dui.uagrm.edu.bo/Informacion/Expociencia2014/1670.pdf>
- [5] Carpenter S. J. 2006. *Reflexiones sobre el maíz prehispánico en Sinaloa y Sonora*. Comunicación personal. Recuperado de [http://biblioteca.utm.mx/principal\\_lib.php?ultimas=1%22](http://biblioteca.utm.mx/principal_lib.php?ultimas=1%22)
- [6] Carpenter J., Sánchez G. & E. Villalpando 2005. *The Late Archaic/Early Agricultural Period in Sonora, Mexico*. *New Perspective on the Late Archaic Across the Borderlands*. University of Texas Press, Austin. Recuperado de <https://scholar.google.com.mx/scholar?q=Carpenter+J.,+Sánchez+G>.





- [7] Chandler J., Nardmann J. y W. Werr. 2008. *Plant development revolves around axes*. *Trends Plant Sci*. Consultado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18262821> Junio 2017
- [8] García H. J. (1992) *El proceso al sulfito* Universidad Politécnica de Cataluña España recuperado de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36487/1400510083.pdf?sequence=1>
- [9] De la Macorra G. C. (2004) *Tratamiento de impregnación con álcali y peróxido de hidrógeno para reducir el consumo energético en la producción de pastas mecánicas: modificaciones estructurales de la molécula de lignina* Madrid Recuperado de <https://es.scribd.com/document/156386375/Sul-Fo-Nacion-44>
- [10] Doebley, J. & H. H. Iltis. 1980. Taxonomy of Zea (Gramineae). I. A subgeneric classification with key to taxa. *Amer. J. Bot.* 67(6): 982-993. Recuperado de [https://teosinte.wisc.edu/pdfs/AJB\\_1980\\_1.pdf](https://teosinte.wisc.edu/pdfs/AJB_1980_1.pdf)
- [11] Estadísticas a propósito de la industria del papel Instituto Nacional de Estadística y Geografía [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) Recuperado [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/economico/a\\_proposi\\_de/Papel.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/economico/a_proposi_de/Papel.pdf) consultado: Julio 2017
- [12] Hernandez A., (2014) *Propuesta de instalación de una planta productora de pulpa para papel a partir de lirio acuático* (tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores, Cuautitlán, México
- [13] Hernández, M. (2008). *Elaboración y caracterización del papel artesanal de la corona del fruto de dos variedades de piña Ananas comosus (L.) Merr.* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, México. Recuperado de [http://portal.chapingo.mx/dicifo/tesislic/2008/hernandez\\_ortega\\_maricela\\_2008](http://portal.chapingo.mx/dicifo/tesislic/2008/hernandez_ortega_maricela_2008).



- [14] Kato Y., T. A. (1984) *Chromosome morphology and the origin of maize and its races*. Evol. Biol. Roma Italia consultado de: Turrent-Serratos\_ContextBackgroundMaizeWildRelativesMexico\_CEC-Chapter1.pdf
- [15] Keefe, A., & Teschke, K. (1995). *Industria del papel y de la pasta de papel*. Fuentes de fibra para la fabricación de pasta y de papel p.p. 72.5 <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/72.pdf>
- [16] Kubo, S.; Kadla, J. (2005). *Hydrogen bonding in lignin: a Fourier transform infrared model compound study*. Biomacromolecules Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/485/48549610006.pdf>
- [17] Prado M., Anzaldo J., Becerra, B., Palacios H., Vargas J. de J., & Rentería M. (2012). *Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta* Universidad de Caldas revista. luna azul Luna Azul ISSN 1909-2474 No. 43, julio - diciembre 2016. 2016;. *Madera y Bosques*, 18(3),3751. <http://redined.mecd.gob.es/xmlui/bitstream/handle/11162/107/00120093001110.pdf?sequence=1>
- [18] Revista Ambientum. (2002). *Plan de Residuos Industriales 2002-2010 de Castilla León*. Recuperado de [http://www.ambientum.com/revista/2003\\_05/RSDINDUSTRIALES.htm](http://www.ambientum.com/revista/2003_05/RSDINDUSTRIALES.htm) Consultado enero 2018
- [19] Papel y medio ambiente, Revista El Ecologista n° 42, Miguel Ángel Soto, Responsable de la campaña de bosques de Greenpeace Consultado de: <https://issuu.com/ecologistasenaccion/docs/ee42> Consultado Enero 2018
- [20] Panorama agroalimentario dirección de investigación y evaluación económica sectorial maíz 2016 Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama\\_Agroalimentario\\_Maiz\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario_Maiz_2016.pdf) Consultado: Diciembre 2017



- [21] Romero C., (2015) *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 Facultad de Estudios Superiores, Cuautitlán, México
- [22] Silvie T. (1991)*Appendices. A Short History of Papermaking. Which Paper?*. Ed. Design Press. New York:. 114-116  
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/download/7748/7412>
- [23] Teschke, K. & Demers P. (2000) *industria del papel y de la pasta de papel* Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo  
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/72.pdf>
- [24] Torres M. (2000) *Normalización del proceso de elaboración de papel artesanal a partir de tallos de maíz (zea mayze)* Universidad de la Sabana Facultad de Ingeniería Chia, Cundinamarca Santa Fe de Bogotá, Colombia. Recuperado de :  
<https://core.ac.uk/download/pdf/47068958.pdf>
- [25] Treviño J. Hernandez M.T *Estudio del valor nutritivo de las hojas y tallos de maíz híbridos de tallo azucarado E-10* instituto de alimentación y productividad animal Madrid. Recuperado de file:///C:/Users/hp%20mini/Downloads/542-1776-1-PB%20(2).pdf  
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/66200/1/Caracterizaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20de%20fibras%20de%20plantas%20herb%C3%A1ceas.pdf>
- [26] Villaseñor, J. & Rutiaga, J. (2000). *La madera de Casuarina equisetifolia L., química e índices de calidad de pulpa*. Madera y Bosques, vol. 6, núm. 1, 2000, pp. 29-40 Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México. Recuperado de:  
<http://www.redalyc.org/pdf/617/61760103.pdf>



- [27] Papel y medio ambiente, Revista El Ecologista n° 42, Miguel Ángel Soto, Responsable de la campaña de bosques de Greenpeace Consultado: Julio 2017
- [28] Ortigosa J.A. (2006) *Perspectivas energéticas en la competitividad del sector del papel* El diagnóstico de los observatorios industriales, Situación y respectiva Sectorial España recuperado de:  
[http://www.minetad.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/385/Juan%20Alberto%20Ortigosa%20Go%C3%B1i%20\(2\).](http://www.minetad.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/385/Juan%20Alberto%20Ortigosa%20Go%C3%B1i%20(2).)
- [29] Pontifica universidad Católica de Chile  
[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/cultivos/cereales/maiz/tallo.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/maiz/tallo.htm) Consulta: noviembre, diciembre 2017
- [30] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura  
<http://www.fao.org/docrep/w7990s/w7990s08.htm> Consulta: noviembre 2017, enero 2018, febrero 2018
- [31] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera <https://www.gob.mx/siap>  
Consulta: diciembre 2017 enero 2018
- [32] Textos Científicos <https://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/semiquimica>  
Consulta: diciembre 2017
- [33] Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología <https://www.conacyt.gob.mx> Consulta: agosto 2017
- [34] Álvarez R. (1955) Recolección y conservación del maíz hojas divulgadoras Núm. 1-55 H Madrid. Recuperado de:  
[http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1955\\_01.pdf](http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1955_01.pdf)
- [35] Balance Nacional de Energía 2014  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2016\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf) Consulta: Enero 2018
- [36] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura  
<http://www.fao.org/home/es/> Consulta: Enero 2018
- [37] Pasturas de América <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/> Consulta: Enero-Febrero 2108



- [38] Material de la asignatura de paquete terminal Papel y Celulosa, (2016) Ingeniería Química UNAM Cuautitlán Izcalli, México



## ANEXO I

### Panorama agroalimentario maíz 2016

#### Producción mundial de maíz (miles de toneladas)

	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017*
Estados Unidos	267,503	331,177	305,911	331,921	315,618	312,789	273,192	351,272	361,091	345,486	382,476
China	151,600	152,300	165,914	163,974	177,245	192,780	205,614	218,490	215,646	224,580	216,000
Brasil	51,000	58,600	51,000	56,100	57,400	73,000	81,500	80,000	85,000	67,000	83,500
Unión europea	55,887	49,481	65,131	59,540	58,618	68,316	59,142	64,931	75,840	58,481	60,279
Argentina	22,500	22,017	15,500	25,000	25,200	21,000	27,000	26,000	28,700	28,000	36,500
Ucrania	6,426	7,421	11,447	10,486	11,919	22,838	20,922	30,900	28,450	23,333	26,000
India	15,097	18,955	19,731	16,719	21,726	21,759	22,258	24,259	24,170	21,800	24,500
México	22,350	23,600	24,226	20,374	21,058	18,726	21,591	22,880	25,480	25,800	24,500
Rusia	3,510	3,798	6,682	3,963	3,075	6,962	8,213	11,635	11,325	13,168	14,000
Sudáfrica	7,300	13,164	12,567	13,420	10,924	12,759	12,365	14,925	10,629	7,900	13,000
Resto de países	113,403	115,141	121,966	123,740	133,092	138,853	137,971	145,524	148,039	143,593	144,938

Fuente: USDA.

\*Estimado.

#### Producción nacional de maíz grano

Variable	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Superficie sembrada (miles de hectáreas)	7,979	7,807	8,117	7,942	7,726	7,861	7,750	7,372	7,487	7,426	7,600
Superficie cosechada (miles de hectáreas)	6,606	7,295	7,333	7,344	6,223	7,148	6,069	6,924	7,096	7,060	7,099
Producción (miles de toneladas)	19,339	21,893	23,513	24,410	20,143	23,302	17,635	22,069	22,664	23,273	24,694
Rendimiento (toneladas/hectárea)	2.93	3.00	3.21	3.32	3.24	3.26	2.91	3.19	3.19	3.30	3.48

Fuente: SIACON-SAGARPA y SIAP.

#### Principales estados productores de maíz (miles de toneladas)

Estado	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sinaloa	4,193	4,398	5,133	5,369	5,237	5,228	2,929	3,647	3,628	3,686	5,380
Jalisco	2,620	3,030	3,252	3,205	2,543	3,395	2,519	3,235	3,303	3,472	3,339
Michoacán	1,310	1,406	1,567	1,609	1,182	1,526	1,386	1,802	1,747	1,935	1,722
México	1,211	1,801	2,003	1,902	1,316	1,550	649	1,575	2,013	1,856	2,036
Guanajuato	1,037	1,068	1,374	1,499	844	1,185	1,016	1,218	1,527	1,420	1,362
Chihuahua	671	679	849	830	975	1,069	851	1,113	1,310	1,373	1,437
Guerrero	1,195	1,215	1,304	1,403	1,136	1,414	1,309	1,304	990	1,332	975
Veracruz	889	1,097	966	1,330	1,139	973	1,040	1,275	1,192	1,265	1,212
Chiapas	1,403	1,592	1,526	1,625	1,218	1,394	1,554	1,405	1,529	1,188	1,068
Puebla	778	1,017	942	1,021	658	1,080	612	1,002	942	960	1,002
Resto de estados	4,032	4,589	4,597	4,617	3,894	4,487	3,769	4,493	4,483	4,785	5,162
<b>Total</b>	<b>19,339</b>	<b>21,893</b>	<b>23,513</b>	<b>24,410</b>	<b>20,143</b>	<b>23,302</b>	<b>17,635</b>	<b>22,069</b>	<b>22,664</b>	<b>23,273</b>	<b>24,694</b>

Fuente: SIACON-SAGARPA.



## ANEXO II

### **Términos botánicos manejados en la tesis**

Inflorescencia: f. Bot. Forma en que aparecen colocadas las flores en las plantas.  
Inflorescencia en umbela, en espiga, en racimo, en ramillete.

Monoica: adj. Bot. Dicho de una planta: Que tiene separadas las flores de cada sexo, pero en un mismo pie.

Virosis: f. Enfermedad cuyo origen se atribuye a virus patógenos.

Panícula: f. Bot. Panoja o espiga de flores.

Espádices: m. Bot. Inflorescencia en forma de espiga, con eje carnoso, y casi siempre envuelta en una espata, por ejemplo el aro y la cala.

Elongación: f. alargamiento.

Espatas: f. Bot. Bráctea grande o conjunto de brácteas que envuelve ciertas inflorescencias, como en la cebolla y en el ajo.

Apical: adj. Perteneciente o relativo a un ápice o punta, o localizado en ellos.



### ANEXO III

#### Nomenclatura

CCS: Proceso a la sosa en frío (cold caustic soda)

FNM: Fibras no maderables

MMT: Millones de toneladas

PIB: Producto interno bruto

PSGW: Pasta mecánica de muela bajo presión

PSGW-S: Pasta mecánica de muela bajo alta presión

PJ: Pentajoules

QRMP: Pasta químico refino mecánica

QTMP: Pasta químico termo mecánica

RMP: Pasta mecánica de refino

SGW: Pasta mecánica de muela.

T: Temperatura en la segunda etapa de impregnación, °C

TCF: Libre de cloro total (total chlorine free)

TMP: Pasta termo mecánica

TMCA: Tasa máxima de crecimiento anual

TTV: Transición vítrea