



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES, CUAUTITLÁN**

**FORMACIÓN DE HOJAS DE PAPEL CON PULPA CELULÓSICA NO  
MADERABLE OBTENIDA A PARTIR DE LA HOJA DE CHAYOTE  
(*SECHIAM EDULE*)**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:  
KARLA STEPHANIE ENCISO GONZÁLEZ.**

**ASESOR: Q. CELESTINO SILVA ESCALONA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **DEDICATORIA.**

A mi padre Francisco Enciso por su apoyo infinito, por estar conmigo siempre y no abandonarme en mis peores momentos. Por enseñarme a ser perseverante y nunca rendirme ante las dificultades de la vida, por amarme de manera incondicional y por todos aquellos sacrificios que con amor hizo para que pudiera ser una mujer profesionalista. Gracias papá por cuidar siempre de mí, y por nunca apartarte de mi lado, siempre estaré eternamente agradecida contigo, te amo.

A mis abuelos María Elena Ramírez y Pedro Enciso por apoyarme en los momentos en que más los necesitaba, por sus consejos llenos de sabiduría y su cariño incondicional. Por inculcarme valores y educarme, pues gracias a ustedes soy una mujer de bien. Les agradezco por permanecer a mi lado y nunca soltarme. Los amo.

A mi hermana Itzel Enciso por estar siempre conmigo, por aguantar mis momentos de estrés y enojo, por creer en mí en todo momento y por escucharme y darme consejos cuando más los necesitaba. Gracias por enseñarme que todo en esta vida es posible, te admiro porque eres una gran mujer, y te agradezco por estar en mis mejores y peores momentos.

A mis familiares, en especial a Lucía Enciso e Irma Enciso por apoyarme y estar presentes en cada momento de mi vida.

Y finalmente a Alberto Arroyo, una persona especial para mí, quien fue el ingrediente perfecto para poder lograr esta merecida victoria en la vida. Te agradezco el apoyo incondicional que me has brindado, por estar en mis momentos más difíciles, y por motivarme. Gracias por preocuparte por mí y por siempre querer lo mejor en mi vida, te quiero infinitamente.

## **AGREDECIMIENTOS.**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte de ella y por abrirme las puertas del conocimiento y así formarme como profesionalista.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por los conocimientos adquiridos durante mi formación académica, por los momentos vividos dentro y fuera de las aulas de clase, por aquellas amistades que hice, de las cuales guardo buenos recuerdos. Y por los grandes profesores que conocí a lo largo de este tiempo.

Al Q. Celestino Silva por dirigir mi trabajo de tesis y estar siempre pendiente del desarrollo del mismo. Por sus conocimientos compartidos y el tiempo dedicado a este trabajo.

Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico, es también un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas.

**Marie Curie (1867 – 1934)**

# ÍNDICE

RESUMEN. ....	1
JUSTIFICACIÓN. ....	2
OBJETIVOS .....	3
INTRODUCCIÓN. ....	4
1. ASPECTOS GENERALES .....	5
1.1 Antecedentes generales del Chayote. ....	5
1.1.1 Origen.....	6
1.1.2 Distribución geográfica .....	7
1.1.3 Clasificación Taxonómica .....	8
1.1.4 Tipos de Chayote.....	10
1.2 Caracteres somáticos .....	12
1.2.3 Fenología.....	12
1.3 Composición química del Chayote y de sus hojas .....	13
1.4 Usos del Chayote en México.....	15
1.4.1 Fruto .....	16
1.4.2 Alimento.....	17
1.4.3 Hojas de Chayote y sus usos .....	17
1.4.4 Industria .....	18
1.5. Importancia económica y social .....	19
1.6 Empleo de fibras vegetales no maderables para la obtención de papel .....	20
1.7 Métodos de obtención de fibra celulósica .....	20
1.7.1 Método mecánico.....	20
1.7.2 Método químico .....	22
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	25
2.1 Materiales.....	25
2.2 Diagrama de bloques del proceso.....	27
2.3 Experimentación .....	27
2.3.1 Descripción del proceso a nivel laboratorio para la formación de las hojas de papel .....	28
i. Obtención de materia prima .....	28
ii. Deshojado y corte .....	28
iii. Digestión .....	29

iv. Lavado de la pulpa celulósica .....	29
v. Licuado de la pulpa celulósica.....	30
vi. Blanqueamiento de la pulpa celulósica .....	31
vii. Segundo lavado de la pulpa celulósica .....	31
viii. Adición de cargas y aditivos .....	32
ix. Formación de las hojas de papel.....	32
x. Prensado.....	32
xi. Secado de las hojas .....	33
xii. Obtención de las hojas de papel .....	33
2.3.2 Descripción del proceso a nivel planta piloto para la formación de las hojas de papel .....	34
i. Obtención de la materia prima .....	34
ii. Deshojado y corte .....	34
iii. Digestión .....	35
iv. Obtención de la pulpa celulósica.....	36
v. Lavado de la pulpa celulósica .....	37
vi. Blanqueamiento de la pulpa celulósica .....	37
vii. Segundo lavado de la pulpa celulósica .....	38
viii. Adición de cargas y aditivos .....	38
ix. Formación de las hojas .....	38
x. Prensado de las hojas.....	39
xi. Secado de las hoja.....	39
xii. Obtención de las hojas de papel .....	40
2.3.3 Tratamiento de residuos .....	40
i. Resguardo de residuos (Licor).....	40
ii. Neutralización.....	41
iii. Desecho de los residuos.....	41
3.1 Caracterización de las hojas de papel .....	41
3.1.1 Espesor.....	42
3.1.2 Peso base.....	44
3.1.3 Densidad aparente.....	45
.....	45
3.1.4 Bulk (Volumen específico aparente) .....	47

3.1.5 Contenido de humedad.....	48
3.1.6 Resistencia a la superficie .....	50
3.1.7 Encolado.....	50
3.1.8 Escritura.....	52
3.1.9 pH .....	55
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN .....	57
4.1 Condiciones de operación óptimas para obtener un buen rendimiento .....	57
4.2 Comparación de la metodología a nivel laboratorio y a nivel planta piloto ...	58
4.3 Resultados de la evaluación de propiedades generales, físicas y mecánicas de las hojas de papel .....	59
CONCLUSIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
ANEXO 1 .....	67
Normatividad utilizada.....	67
ANEXO 2.....	72
Memoria de cálculo.....	72



## **RESUMEN.**

La industria papelera en México es una de las más importantes y solicitadas, ya que el papel es un producto sumamente requerido a diario por su gran demanda en la vida cotidiana de las personas, ya que en cada momento estamos en contacto con este producto, ya sea cuando estamos en la oficina y necesitamos imprimir algún documento o cuando necesitamos plasmar un escrito, por citar algunos ejemplos, no obstante esta demanda ha traído consigo algunos problemas ambientales, ya que como se sabe, para la elaboración de este producto se necesitan fibras maderables, por lo que uno de los objetivos de este trabajo es presentar una alternativa para la elaboración del mismo utilizando fibras no maderables, como lo son desechos orgánicos, ya que el alto consumo de papel puede traducirse en gran cantidad de árboles talados a diario.

En este trabajo para la elaboración de las hojas de papel se utilizó como materia prima las hojas de chayote, en donde se realizaron pruebas a nivel laboratorio y a nivel planta piloto, variando en cada prueba las condiciones de operación, con el fin de encontrar las condiciones óptimas para una buena digestión y poder obtener una hoja de calidad, mostrando así una alternativa para la fabricación de papel.

## **JUSTIFICACIÓN.**

En la actualidad, el tema del cuidado del medio ambiente ha sido muy importante, ya que es aquí donde se desarrolla la vida, sin embargo el hombre ha contribuido día a día a su destrucción. Un problema muy importante es la tala de árboles, en donde la madera es usada para la fabricación de papel, lo cual trae consigo diversos problemas, como la destrucción de bosques, daño a los ecosistemas y calentamiento global, por ende aquí se propone utilizar fibras NO maderables para la elaboración de papel, en este caso las hojas del chayote, una planta abundante, la cual no solo sirve como alimento o como planta medicinal, sino que puede servir como una alternativa para sustituir a la madera.

No obstante, es importante saber cuáles son las condiciones de operación óptimas para obtener una hoja de calidad, por ello aquí se proponen cuatro experimentos, dos a nivel laboratorio y dos a nivel planta piloto, en donde se manipulan variables como presión, cantidad de materia prima, tiempo de cocción, entre otras, para que de esta manera se pueda justificar el uso como materia prima a la hojas de chayote.

## OBJETIVOS

### GENERALES:

- Determinar mediante la utilización del proceso semiquímico de producción de pulpa alcalina a la sosa, las condiciones de operación más propicias de digestión, para la obtención de pulpa celulósica que proporcione una adecuada resistencia mecánica a la formación de hojas a partir de la hoja de chayote (*Sechium Edule*).
- Promover el uso de desechos naturales para la fabricación de papel, para disminuir la tala inmoderada de árboles, logrando así un impacto positivo al medio ambiente y a la sociedad.

### ESPECÍFICOS:

- Determinar cuáles son las condiciones óptimas para tener un buen rendimiento en la fabricación de las hojas de papel.
- Formar hojas de papel con pulpa celulósica obtenida a partir de hojas de chayote (*Sechium Edule*) a nivel laboratorio, y a nivel planta piloto, variando las condiciones de operación.
- Efectuar la medición de algunas propiedades intrínsecas al papel elaborado con hojas de chayote (*Sechium Edule*) como: Espesor, pH, escritura, encolado, resistencia a la superficie, contenido de humedad, densidad aparente y peso base.

## INTRODUCCIÓN.

El papel ha sido uno de los inventos que más ha ayudado en la evolución humana. A través del papel se ha podido transmitir el conocimiento de generación en generación. Antes del papel había otros soportes donde escribir, pero su fabricación era muy elaborada y costosa.

El soporte de escritura más antiguo fue el papiro, inventado por los egipcios en el tercer milenio antes de Cristo, al papiro le siguió el pergamino, obtenido a partir de la piel del cordero, ternera y cabra. Después llegaría el papel, creado en China. El primer sistema era muy pesado, y el segundo muy costoso.

Se puede afirmar que el papel se inventó en el año 105 d.c. Fue entonces cuando el eunuco Cai Lun se dio cuenta de que los materiales que estaban usando no eran los más adecuados para los manuscritos. Entonces se centró en la corteza de los árboles, en el cáñamo y en los paños deshechos. Éste, presentó al emperador He de Han un nuevo sistema para transformar estas materias primas en una nueva superficie: El papel. Poco a poco la nueva técnica fue mejorando. Una vez perfeccionada ésta se difundió por toda China, Corea, Vietnam y Japón.<sup>27</sup>

Actualmente es bien sabido que la industria papelera es una de las más contaminantes por su alto consumo de agua y de energía, por la gran cantidad de madera que se requiere y por los químicos utilizados en la fabricación de las hojas, lo cual nos lleva a crear alternativas para disminuir el gran impacto ambiental que tiene esta industria y ser amables con la naturaleza. Una opción es sustituir la madera por fibras no maderables, como los son desechos orgánicos o plantas que se dan en gran abundancia, lo cual es bueno, ya que lo que se puede considerar como desecho puede volver a tener un uso, por ello, en el presente trabajo se propone utilizar como materia prima la hoja del chayote, la cual es una planta en la que se utiliza comúnmente el fruto como alimento, y la hoja es olvidada en ciertas ocasiones, sin embargo es una opción viable para crear hojas de papel.

Es importante señalar cuales son las condiciones de operación más óptimas para obtener una hoja de papel con una buena calidad, por ello se pretende realizar diferentes corridas, dos a nivel laboratorio y dos a nivel planta piloto para que en cada una de ellas se varié las condiciones de operación para que al final se pueda hacer una comparación de las hojas y así determinar la calidad de cada una de ellas en base a normas y especificaciones, haciéndoles pruebas tanto físicas como mecánicas.

De este modo estamos ayudando a crear alternativas para disminuir la contaminación ambiental y los focos de infección por la descomposición de desechos orgánicos, y así brindarles a futuras generaciones un buen sitio para vivir.

# 1. ASPECTOS GENERALES

## 1.1 Antecedentes generales del chayote.

La mayor evidencia del origen del chayote es la existencia de chayotes silvestres en la región centro y sur de México, así como en Centro América. Se considera que el término moderno chayote es una modificación de los vocablos Náhuatl “huizt ayotl que significa calabaza con espinas, que pudo derivar en “chayotl” y en la actualidad a “chayote”, lo cual confirmaría el uso de esta planta desde tiempos precolombinos<sup>5</sup>.

El naturalista europeo Francisco Hernández, quien vivió en México durante el período comprendido entre los siglos XV y XVI (Cook, 1901), fue uno de los primeros en informar sobre la existencia del chayote, y preparó voluminosas descripciones sobre la Nueva España, su pueblo e historia natural. En estos tratados que fueron publicados en Roma en 1651, incluyó plantas medicinales y comestibles. Más tarde el abate Francisco Xavier Clavijero en su tratado sobre la historia antigua de México, describió al chayote como:

“Una fruta redonda y semejante en el erizo de que está cubierta, a la castaña; pero mucho más grande y de un color verde más oscuro. Su carne es blanca, que tira a verde, y en el medio tiene una pepita grande y blanca, semejante a la carne en la sustancia. Se come cocido juntamente con la pepita. Esta fruta se da en una planta enredadera y vivaz, cuya raíz es buena para comerse<sup>5</sup>.”

El chayote (*Sechium edule*) pertenece a la familia Cucurbitaceae, pero a diferencia de otras como el pepino, el melón y la sandía, es nativo, junto con la calabaza, del nuevo mundo, y México es considerado como uno de los países donde ambos se domesticaron y continúan siendo parte de la dieta básica. Existen alrededor de 18 especies del género *Sechium*.

Es una planta perenne de renovación anual y de tallos trepadores. Sus hojas son amplias (9.5 a 18 cm de largo y 11 a 21.5 de ancho), ovadas o pentagonales. Tiene de 3 a 5 zarcillos gruesos y ramificados. Sus flores son pequeñas y blancas y se

distribuyen en racimos compuestos. El color del fruto fluctúa del verde oscuro a tonos más claros, e incluso llega al amarillo. Es carnoso y puede ser espinoso. Mide de 7 a 20 cm de largo, su peso varía entre 300 g hasta 2 kg. Su semilla, comúnmente llamada pepita, también se consume como botana<sup>7</sup>.

Se cultiva por su fruto, cuya pulpa es comestible y popular en la gastronomía nacional, Crece mejor en climas templados de entre 13 °C y 21 °C con abundante lluvia. Como es una planta que se encumbra, al sembrarla es necesario situarla sobre una reja inclinada hacia el oriente de modo que sea capaz de crecer apropiadamente. Requiere que la humedad oscile entre 80 % y 85 % y deben pasar de 90 a 110 días para obtener el primer fruto. En un área de 400 metros se pueden producir alrededor de 14,000 chayotes con un peso aproximado de 350 g en el plazo de seis meses. Por cada planta se pueden producir alrededor de 47 kg en un año, lo que equivale a \$296.84 pesos por cada planta, considerando que el precio promedio en el país es de 6.31 pesos el kilo.<sup>7</sup>

### **1.1.1 Origen**

A diferencia de otros cultivos, no existen indicios arqueológicos que indiquen la antigüedad del cultivo de *Sechium edule*. Sus frutos carnosos, con una sola semilla de testa suave, no permiten su conservación y, hasta donde se sabe, tampoco se han identificado en yacimientos arqueológicos granos de polen u otra estructura de esta especie.

Crónicas de la época de la Conquista indican que, cuando menos en México, el chayote ha sido cultivado desde épocas precolombinas. En cuanto a las referencias lingüísticas, los nombres comunes de origen nativo se concentran principalmente en México y América Central. En cuanto a los testimonios derivados de la diversidad bajo cultivo de *Sechium edule*, los registros de exploraciones coinciden en que la mayor variación se encuentra entre el sur de México y Guatemala. La distribución geográfica de los parientes silvestres de *Sechium edule* también confirma el origen mesoamericano de este cultivo.

Los parientes más cercanos a *Sechium edule* son:

- Los llamados tipos silvestres de *Sechium edule*, cuya ubicación taxonómica se encuentra pendiente, ya que se hallan distribuidos de manera aparentemente natural en los estados mexicanos de Veracruz, Puebla, Hidalgo, Oaxaca y Chiapas;
- *Sechium compositum*, especie restringida al sur de México (Chiapas) y Guatemala;
- *Sechium hintonii*, especie endémica de México, hasta hace poco considerada como extinta, que crece tanto en el estado de México, Guerrero y tal vez en Jalisco;
- Una especie nueva de la sección *Sechium* que habita en el norte del estado de Oaxaca.

Lo anterior ha permitido corroborar que *Sechium edule* es una especie que sin duda fue domesticada dentro del área cultural de Mesoamérica, y precisamente en la región comprendida entre el sur de México y Guatemala.

El cultivo del chayote está ampliamente difundido en Mesoamérica. Su introducción en las Antillas y América del Sur se llevó a cabo entre los siglos XVIII y XIX; de hecho, la primera descripción botánica en la que se menciona el nombre *Sechium* se debe a P. Brown en 1756, y se refiere a plantas cultivadas en Jamaica. En esta misma época, el chayote se introdujo en Europa, desde donde fue llevado a África, Asia y Australia, mientras que su introducción en los Estados Unidos data de fines del siglo xix.<sup>24</sup>

### **1.1.2 Distribución geográfica**

En las últimas dos décadas esta especie ha prosperado comercialmente de hortaliza de traspatio, a producto no tradicional de exportación (Cadena et al., 2001), su demanda principal es el mercado de Norte América (Lira-Saade, 1996, Cadena, 2005). En México, los estados que mantienen una producción importante son Veracruz, Jalisco, Michoacán, Nayarit y San Luis Potosí<sup>5</sup>.

El chayote se cultiva de manera tradicional en muchas regiones del mundo, preferentemente entre los 800 y 1 800 m de altitud. En muchas regiones existen

variantes adaptadas al cultivo a nivel del mar (en Río de Janeiro y Yucatán); en otras se da por encima de los 2 000 m (en Bolivia y en México, en Oaxaca y Chihuahua). Los taxa silvestres más cercanos a *Sechium edule* presentan una distribución de altitudes similar, ya que crecen entre los 50 y 2 100 m. El chayote es cultivado de manera más intensiva y con fines comerciales en Costa Rica, Guatemala, República Dominicana y México. La diversidad manejada es mínima y siempre de acuerdo a los requerimientos de los consumidores<sup>24</sup>.

En la región central de Veracruz se han encontrado plantas con frutos de diferente forma, tamaño, color, sabor y textura; asimismo la diversidad se refleja en la forma y venación de las hojas, color del pecíolo, guías y tamaño de flor. Estas plantas que normalmente se encuentran en áreas de traspatio, producen fruto cuyo fin es la venta en mercados locales y autoconsumo (Cadena-Iñiguez, 2005)<sup>1</sup>.

**Tabla 1.** Estados productores de chayote en México<sup>5</sup>.

Estados	Superficie Cultivada (ha)	Producción Total (Ton)	Jornales Año	Empleos Equivalente <sup>1</sup>
B. California	18	153	17,016	227
Guanajuato	37	N/R	34,978	466
Jalisco	847	27,527	800,720	10,676
Edo. México	69	2,208	65,230	870
Michoacán	112	180	105,880	1,412
S. Luis Potosí	60	4,020	56,722	756
Chiapas	37	1,739	34,978	466
Nayarit	33	2,970	31,197	416
Veracruz	2,500	246,000	2'363,400	31,512
<b>Total</b>	<b>3,713</b>	<b>284,797</b>	<b>3'510,122</b>	<b>46,802</b>

1: 75 jornales equivalen a un empleo fijo (INEGI, 2005); N/R= no reportado  
Fuente: [Bancomext, 1999; Cadena-Iñiguez y Arévalo-Galarza, 2008]

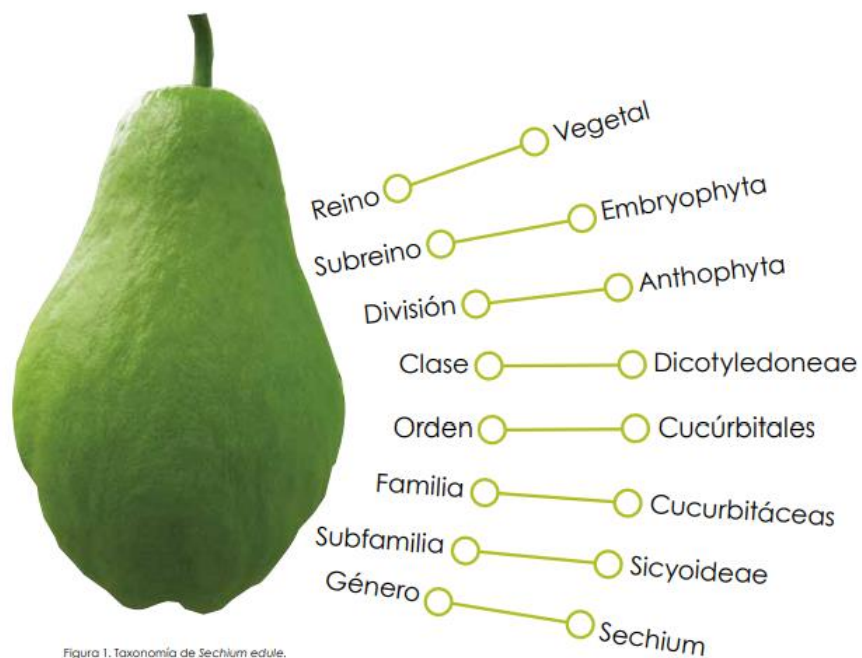
### 1.1.3 Clasificación Taxonómica

La taxonomía es la ciencia de la clasificación, una subdisciplina de la Biología Sistemática, cuyo intrincado objetivo consiste en organizar la gran diversidad de



seres vivos que habitan en nuestro planeta a través de una jerarquía y nomenclatura<sup>20</sup>.

Por lo que es importante conocer la taxonomía del chayote para facilitar su clasificación y grupo sistemático:



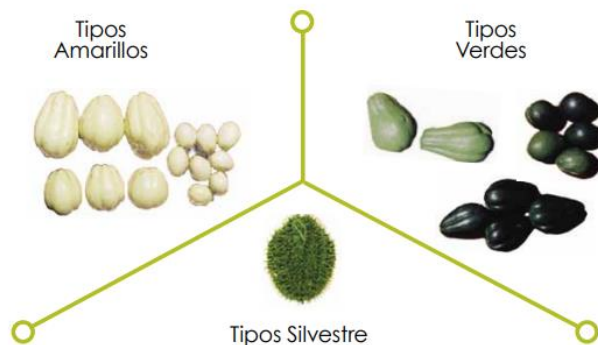
**Figura 1.** Clasificación Taxonómica de Chayote (*Sechium Edule*)<sup>1</sup>

Planta herbáceo, perenne de renovación anual; con numerosos tallos trepadores, ramificados, pubescentes, de gran longitud. Las hojas son alternas, pecioladas, membranosas, lobuladas, con bordes aserrados, con un recorte profundo en la inserción del pecíolo, miden de 10 – 30 cm de largo por 5 – 20 cm de ancho, provistas de pelos viscosos, zarcillos de 3 – 5, partidos. Planta Monoica de flores unisexuales pequeñas, las masculinas agrupadas en racimos con 5 estambres y las

femeninas solitarias, ambas asilares en el mismo nudo; las flores femeninas tienen ovario ínfero, estilo que termina en un estigma discorde, al igual que las masculinas poseen 5 sépalos verdosos, 5 pétalos amarillentos y 10 nectarios evidentes a simple vista. El fruto es una baya periforme, ovoide, alargada o redonda, con una hendidura en el extremo opuesto a la inserción del pedúnculo, por la cual asoma a la semilla en frutos maduros; algunos tipos desarrollan espinas de diferente consistencia, número y longitud, y en otros estas son ausentes; el color del fruto presenta varias tonalidades dentro del espectro que van del blanco amarillento al verde oscuro; en cuanto a peso varío de unos cuantos a más de 1000 g posee una sola semilla grande y comprimida que no puede separarse del resto del fruto hasta que el sistema radical está bien desarrollado; presenta el fenómeno de viviparidad. Tiene raíces fibrosas y algunas de ellas se tuberizan en los extremos; a estas se les conoce como “Chayotextle”, “Chinchayote”, “Coeza”, “Camochoyote” o “Chayotectli”, siendo muy apreciadas como alimento<sup>8</sup>.

#### 1.1.4 Tipos de Chayote

La planta de *Sechium edule* es de polinización cruzada, por lo que la variación se convierte en un proceso dinámico y continuo que favorece la variación infraespecífica.



**Figura 2.** Muestra de a variación biológica de *Sechium Edule*<sup>1</sup>

En México, Cruz-León y Querol-Lipcovich (1985), destacaron en su catálogo de recursos genéticos para chayote, una amplia variación morfológica. Este trabajo

estuvo muy relacionado metodológicamente con el realizado por Maffioli (1981), para localidades del sur de México y Centro América. Con el fin de documentar la diversidad, estos autores establecieron cinco descriptores morfológicos exclusivamente de frutos y realizaron un catálogo. Lira-Saade (1995), denominó a la variación biológica documentada como razas locales, y más tarde propuso la subdivisión en dos subespecies: *Sechium edule* spp. *edule* para los tipos cultivados y *Sechium edule* spp. *sylvestre* para tipos silvestres. Esta propuesta se basó en diferencias morfológicas y cromosómicas a través de la identificación de cariotipos<sup>1</sup>.

Recientemente se ha demostrado a través del análisis de variación morfoestructural, bioquímico, fisiológico y genético, la existencia de caracteres secundarios estables que permiten la distinción de los tipos biológicos existentes, y con base en ellos, Cadena-Iñiguez y colaboradores desarrollaron una clasificación para el complejo infraespecífico de *Sechium edule* como variedades botánicas, considerando las premisas que debe cumplir un sistema de clasificación para la variación en plantas cultivadas. Este sistema establece la identidad de los tipos biológicos con base en un mayor número de características distintivas, que no necesariamente deben ser morfológicas, sino que expresen la variación taxonómica existente, sin que su aplicación sea demasiado complicada y que se formule de forma separada de cualquier propuesta de cambio del código internacional de nomenclatura para las plantas cultivadas (Styles, 1986). Esta propuesta de nomenclatura científica para *Sechium edule*, guarda las reglas establecidas para la clasificación infraespecífica discutidas por Harlan (1986), Rindos (1984), Stace (1986), Hanelt (1986), Oost (1986) y Pickersgill (1986), denominada "informal", vigente para plantas cultivadas y no afecta la nomenclatura formal de la especie, ya que se descarta la ubicación de sub especies por la de variedad, considerando que ésta última se ubica en la jerarquía varietal, de forma intermedia entre la especie y la subespecie (CadenaIñiguez, 2005; Cadena-Iñiguez et al., 2008).

De acuerdo con Pinedo-Vásquez et al. (2000), la variedad está referida a cada uno de los grupos dentro de un complejo, que se distinguen por características secundarias pero permanentes, que permiten identificar la variabilidad y que

expresa un número suficiente de caracteres distintivos, los cuales se mantienen en las poblaciones a través de una reproducción panmíctica dentro de la propia zona geográfica de adaptación, como es el caso de las variedades de chayote<sup>1</sup>.

## **1.2 Caracteres somáticos**

### **1.2.3 Fenología**

La fenología es una rama de la ecología que estudia los fenómenos periódicos de los seres vivos y sus relaciones con las condiciones ambientales, donde el clima representa el principal factor que influye en el crecimiento, desarrollo y distribución de las especies; por ello, los requerimientos bioclimáticos de una especie vegetal delimitan las zonas geográficas que cubren de manera satisfactoria su demanda como cultivo.

A este respecto, los elementos del clima que mayor influencia ejercen en la producción de los fenómenos periódicos de las plantas son: el régimen de temperaturas a través del año, el régimen pluviométrico, y la variación periódica de la duración del día o foto periodo<sup>1</sup>.

En términos generales se ha registrado que si la fecha de siembra ocurre en la última quincena de diciembre, la floración ocurrirá en junio y su fructificación será de julio a diciembre del mismo año. Sin embargo, si la siembra se realiza en junio, la floración y fructificación ocurrirá a los tres meses, con un periodo de fructificación de septiembre a marzo-abril del siguiente año con riegos de auxilio, lo cual permite planificar la demanda de diferentes ventanas de mercado, tanto nacional como internacional.

Las características anteriores guardan una estrecha relación con el régimen pluviométrico y de temperaturas en cada zona. Estudios realizados por Cadena-Iñiguez et al. (2001), han demostrado que el rango de temperatura adecuado para el cultivo de chayote es de 26-32 °C, siendo 26 °C la óptima, con humedad ambiental de 80-90 %. Sin embargo, las variedades de fruto amarillo (albus minor, albus dulcis, albus levis) presentan mayor tolerancia a los climas de selva mediana

perennifolia, subperennifolia y trópico seco tales como sitios con vegetación de selva baja caducifolia en condiciones de riego. Mientras que la variedad n. spinosum de fruto verde con espinas, es preferentemente para zonas de valles altos (2000-2800 m) con periodos cortos de fructificación no mayores a cuatro meses, ya que las heladas en este tipo de sitios elimina la parte aérea de la planta<sup>1</sup>.

*Sechium edule* se encuentra, en condición silvestre, en altitudes que oscilan entre los 800 y 1400 m, y como cultivo en altitudes muy diversas que van desde los 300 hasta los 2500 m, con requerimientos de alta humedad ambiental (80-85 %), suelos ácidos a ligeramente ácidos (4.5 a 6.5 de pH), bien drenados y ricos en humus (Flores, 1989). Bajo condiciones de cultivo, prospera en suelos calcáreos y ligeramente salinos como en Actopan, Veracruz, Santa María del Río, SLP, y región de Chapala, Jalisco, México con fuertes limitaciones para su crecimiento y desarrollo (Cadena, et al., 2001). El chayote requiere una precipitación media anual que oscile entre 1500 a 2000 mm bien distribuida, foto periodo de hasta 12 horas luz para inicio de floración y temperaturas de 20 a 26 °C (Flores, 1989, Valverde et al., 1986). Es muy susceptible a la sequía, heladas o excesos de humedad que generalmente ocasionan muerte de la planta, en localidades muy cálidas crece mejor en meses con menor temperatura ambiental (Cadena et al., 2001). Con el fin de establecer los parámetros y calidad de los suelos para el cultivo de chayote, es notable que las mejores curvas de crecimiento se obtienen en suelos de bosque mesófilo, seguido por los ubicados en vegetación de selva mediana subperennifolia y por último los de mayor limitación en cuanto a la calidad y cantidad de nutrimentos aportados los ubicados en vegetación de selva mediana y baja caducifolia.<sup>1</sup>

### **1.3 Composición química del Chayote y de sus hojas**

El chayote es muy consumido por su alto valor nutritivo. Sin embargo, las otras partes de la planta como el tallo y la raíz, también se consumen y aportan nutrientes importantes, en algunos componentes como carbohidratos, proteínas, ácido ascórbico, niacina, fósforo y en especial el almidón, la raíz tuberizada del chayote supera al mismo fruto (Jiménez et al. 2007), reportó la composición química del tubérculo de chayote en comparación con la papa, en el es posible observar que el contenido de almidón en el tubérculo del chayote (72.80 %) es muy parecido al de

la papa (70.01 %), por lo que es posible que el tubérculo chayote pueda ser considerado una nueva fuente de almidón y a su vez competir con la papa (Hernández et al., 2011)<sup>14</sup>.

**Tabla 2.** Composición química del fruto, tallos jóvenes y raíces de *Sechium edule* Sw. Fuente: Lira-Saade, 1996<sup>14</sup>.

Componente	Fruto	Semilla	Vástago	Raíz
Calorías (%)	26-31	-	60	79
Humedad (%)	89-93.4	-	89.7	79.7
Azúcares solubles (%)	3.3	4.2	0.3	0.6
Almidón (%)	0.2	1.9	0.7	13.6
Proteínas (%)	0.9-1.1	5.5	4	2
Grasas (%)	0.1-0.3	-	0.4	0.2
Carbohidratos (%)	3.5-7.7	60	4.7	17.8
Fibras (%)	0.4-1.0	-	1.2	0.4
Cenizas (%)	0.4-0.6	-	1.2	1
Ca (mg)	12-19	-	58	7
P (mg)	4-30	-	108	34
Fe (mg)	0.2-0.6	-	2.5	0.8
Vitamina (mg) A	5	-	615	-
Tiamina (mg)	0.03	-	0.08	0.05
Riboflavina (mg)	0.04	-	0.18	0.03
Niacina (mg)	0.4-0.5	-	1.1	0.9
Ácido ascórbico (mg)	11-20	-	16	19

**Tabla 3.** Composición química del tubérculo de chayote y papa (g /100g de muestra). Fuente: Jiménez et. al., 2007<sup>14</sup>.

Componente	Tubérculo de chayote	Papa
Humedad	81.3	80.06
Carbohidratos	85.50	85.1
Almidón	72.80	70.01
Fibra	0.17	0.21
Proteínas	10.35	10.07

Estudios realizados, demuestran que entre estos dos tubérculos, existe una similitud en la relación amilosa-amilopectina, y sólo se observan diferencias en cuanto forma y tamaño del gránulo; se reporta que, el tubérculo de chayote contiene un 25.8% de sólidos; los cuales contienen 59.4% de almidón, es decir que, en 10 kg de chayotextle hay 1.5 kg de almidón potencialmente extraíble, obteniendo así un rendimiento de 0.55 kg/kg de raíz tuberizada con una pureza de 89.1% (Ramirez, 2011). Cabe mencionar que tanto las propiedades fisicoquímicas como la forma y el tamaño de gránulo, contenido de amilosa, o el contenido de los componentes sin almidón, muestran variación considerable entre los almidones de dichos tubérculos (Subramony, 2002)<sup>14</sup>.

#### **1.4 Usos del chayote en México**

Como se ha mencionado anteriormente, el chayote es un fruto importante para México, ya que este producto se utiliza principalmente en la cocina mexicana, ya que contiene un alto contenido de agua y fibra, haciéndolo así un fruto esencial para llevar una vida saludable. No obstante, es importante señalar que por la consistencia que posee es posible elaborar una gran cantidad de productos para la industria farmacéutica y alimenticia.

### 1.4.1 Fruto

Es una hortaliza carnosa, jugosa, con sabor tenue, de la familia de las cucurbitáceas y con una semilla muy sabrosa. Tiene forma ovalada y es generalmente de color verde en diferentes tonos. Dependiendo de la variedad pesa entre 200 gramos (g) y 2 kilogramos. La planta en la que crece es una enredadera con guías que rebasan los 6 metros de largo, sus hojas son en forma de corazón y ásperas, las cuales miden entre 10 y 15 centímetros (cm). Además del fruto, también se aprovechan sus guías, sus hojas y su raíz llamada chinchayote o cueza<sup>11</sup>.

En los mercados del país se encuentran tres tipos de chayotes: el común, el erizo y el blanco. El chayote común es de color verde claro, de piel delgada y carne verde blanquecina de sabor suave. Se le encuentra a lo largo del año en todo el territorio nacional, por lo cual es el más usado de los tres. El chayote erizo es de color verde oscuro con piel gruesa cubierta de espinas. Su carne es verde oscuro, ligeramente más clara que la piel, su sabor también es suave, pero con más carácter que el del chayote común. Es más grande que el chayote común y su peso generalmente rebasa los 500 g. Se encuentran en muchas regiones de México, aunque es más frecuente en los estados del centro del país, llegándose a desconocer en otras regiones. El chayote blanco es de color amarillo pálido y pequeño, pues no rebasa los 12 cm de largo. Se vende cada vez con más frecuencia en los mercados del centro del país, pero no es muy utilizado en la cocina regional<sup>11</sup>.

Cabe mencionar que el chayote es un alimento con pocas calorías y una excelente fuente de fibra, por lo cual es ideal para perder peso. Su alto nivel de agua lo hace ideal para combatir el estreñimiento. Al carecer de grasas saturadas, el chayote ayuda a nivelar y controlar el colesterol del cuerpo. Su alto contenido en vitamina B2 y hierro estimulan la producción de glóbulos rojos para prevenir o combatir la anemia. Y regula la presión arterial al ser buena fuente de potasio<sup>11</sup>.



### **1.4.2 Alimento**

El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.), es un producto no tradicional de exportación, cuyo uso principal es el alimentario; además de la raíz, hojas y puntas tiernas de las guías, el fruto en madurez hortícola o fisiológicamente maduro es el órgano principal de consumo como verdura. Esta especie presenta una amplia variación en la forma y color de frutos. La importancia económica que cada variedad de chayote se basa en la preferencia local. El consumidor ha clasificado a los frutos en tres grandes grupos: blancos (amarillos), verdes y espinosos, lo cual además del sabor y consistencia son cualidades importantes; por ejemplo, los hay de sabor simple o neutro (mucho agua en la pulpa y poca fibra), ligeramente dulce como los de fruto amarillo (en estado fisiológicamente maduro) y los amargos. La consistencia “seca” o “camotuda” (almidonosa) y “estropajuda” (fibrosa) de la pulpa son otras características usadas tradicionalmente y están relacionadas con la cocción o uso alimentario, es decir, para hervir con sal, elaborar dulces, guisos caldosos (sopas), comer en frío o asado a semejanza de las papas. Su consumo es principalmente como verdura en crudo para ensaladas, hervido, papilla o elaboración de bebidas. Su uso incluye además la repostería (pasteles) y forma parte de las dietas hospitalarias debido a sus características nutrimentales. De toda la riqueza biológica del chayote, únicamente se conocen a escala comercial dos tipos preferentes, de los cuales uno se ubica en el grupo varietal *virens levis* (verde liso) y el otro en el grupo *nigrum spinosum* (negro espinoso) cuyo destino principal es el mercado de Estados Unidos de América y Canadá<sup>2</sup>.

### **1.4.3 Hojas de chayote y sus usos**

El chayote se emplea en la medicina tradicional como diurético, cardiovascular, antiinflamatorio, contra calcificaciones renales y arteriosclerosis. Se le atribuyen propiedades antihipertensivas y antioxidantes, validadas con estudios farmacológicos<sup>13</sup>.

Las hojas secas como infusión son utilizadas también para el tratamiento de bronquitis. No obstante, se cree también que el jugo de la misma planta sirve para blanquear las pecas o las manchas de la piel.

#### **1.4.4 Industria**

Los usos del chayote no se limitan a la gastronomía, sus aportes van desde el uso medicinal como auxiliar en el tratamiento de diversas dolencias y enfermedades, hasta la fabricación artesanal de cestas y sombreros<sup>12</sup>.

En México se realizan varios proyectos con la finalidad de aumentar la vida útil de los frutos por medio de la deshidratación, lo que ha generado la producción de mermeladas, y orejones de chayote los cuales se aprovechan como verdura después de cierto tiempo<sup>12</sup>.

En la industria de alimentos, el fruto se utiliza en la elaboración de alimentos infantiles, jugos, salsas y pastas<sup>18</sup>.

En la industria farmacéutica:

Recientemente se aisló y caracterizó, en la semilla de chayote, la sechiumina, una proteína con la propiedad de inactivar la función ribosomal en la línea de cáncer cérvico-uterino humano HeLa y se le ubicó como un posible agente quimioterapéutico (Wu et al., 1998). Es importante destacar, que en la mayoría de los estudios farmacológicos y fitoquímicos reportados para *Sechium edule* no se describe la variedad utilizada, presentando riesgo para su aplicación farmacológica en humanos. Por lo que Cadena-Iñiguez et al., (2013), evaluaron extractos de frutos de diferentes genotipos de chayote en líneas celulares tumorales, mostrando que *nigrum spinosum* y *virens levis* fueron los de mayor actividad citotóxica. Estos resultados permiten la generación de nuevas líneas de investigación, enfocadas al mejoramiento genético con fines de aplicación farmacológica<sup>3</sup>.

## 1.5. Importancia económica y social

El cultivo del chayote ha significado una valiosa alternativa para el manejo ecológico de laderas en sustitución de áreas cafetaleras bajo depresión económica, ya que no se usa el azadón ni herbicidas, de tal forma que disminuye el riesgo erosivo por efecto de lluvia debido al amortiguamiento que hace el dosel vegetal (emparrillado o tarima) a la gota de agua, aporte continuo de materia seca por la poda e intercalado de cultivos como frijol ejotero que se hace en los primeros tres meses de establecido (Cadena, 2005). De esta forma además de generar beneficios económicos, constituye un atenuante a la erosión y el equilibrio del potencial hídrico del suelo (Jiménez, 1981). También es un sistema eficiente de generación de empleo local, debido a su alta productividad, lo que promueve la ocupación de jornales, una superficie de 30 hectáreas produce de 2,700-3,900 toneladas de fruta, con un periodo de cosecha de seis meses, cortando cada tercer día. Los ingresos para México son comparables a 100,000 hectáreas libres de subsidio federal cultivadas con maíz. La cantidad de jornales generados por cada estado productor de chayote se aprecian en la siguiente tabla<sup>5</sup>.

**Tabla 4.** Estados productores Chayote en México<sup>5</sup>

Estados	Superficie Cultivada (ha)	Producción Total (Ton)	Jornales Año	Empleos Equivalente <sup>1</sup>
B. California	18	153	17,016	227
Guanajuato	37	N/R	34,978	466
Jalisco	847	27,527	800,720	10,676
Edo. México	69	2,208	65,230	870
Michoacán	112	180	105,880	1,412
S. Luis Potosí	60	4,020	56,722	756
Chiapas	37	1,739	34,978	466
Nayarit	33	2,970	31,197	416
Veracruz	2,500	246,000	2'363,400	31,512
<b>Total</b>	<b>3,713</b>	<b>284,797</b>	<b>3'510,122</b>	<b>46,802</b>

1: 75 jornales equivalen a un empleo fijo (INEGI, 2005); N/R= no reportado  
Fuente: [Bancomext, 1999; Cadena-Iñiguez y Arévalo-Galarza, 2008]

## **1.6 Empleo de fibras vegetales no maderables para la obtención de papel**

Desde la invención del papel en el año 105 d.c. Por Cai Lun muchas fibras se han usado para su manufactura, entre las que se encuentran las fibras liberianas de la linaza y de la morera del papel, los tallos de bambú y otras gramíneas, varias fibras de hojas, el pelo de la semilla de algodón y la paja. Sin embargo, el incremento de la utilidad del papel obligó a investigadores a buscar nuevas fuentes de fibras, con lo que se obtuvo la elaboración de papel a partir de las fibras leñosas de los árboles. No obstante, actualmente existe un elevado crecimiento respecto a la utilización del papel, que ha llevado una vez más a la búsqueda de nuevas fuentes adicionales de fibras que puedan satisfacer la necesidad de mayores cantidades de papel; encontrando como posibles fuentes fibras sintéticas de rayón, orlón y dacrón; las fibras minerales vidrio y asbesto e incluso las fibras animales como la lana (Libby, 1983)<sup>17</sup>.

Las fibras vegetales de mayor utilidad pueden clasificarse tomando en consideración su origen anatómico, su tipificación botánica y sus usos. Hay aquellas que son obtenidas de hojas, raíces, frutos, tallos y semillas. Los residuos agrícolas son las partes de las plantas que se quedan en el campo después de cosechar el cultivo principal y son fuente importante de fibras residuales por ser anualmente renovables, abundantemente disponibles y de valor limitado<sup>6</sup>.

## **1.7 Métodos de obtención de fibra celulósica**

### **1.7.1 Método mecánico**

El funcionamiento de este método es muy sencillo, pues se trata simplemente de obtener partículas de madera de pequeñísimo tamaño, las cuales puedan ser aplicadas directamente en la fabricación de papel, es decir, el tamaño final de partícula ha de ser del orden de unidades de milímetro, tamaño que posibilita la confección de papel<sup>22</sup>.

El proceso consiste en la acción mecánica de frotamiento de un disco giratorio (molino), originariamente de piedra, sobre los troncos de madera. Los troncos son introducidos longitudinalmente de forma perpendicular al disco giratorio, y son presionados contra él para promover la acción abrasiva. El disco está parcialmente sumergido en agua y es rociado constantemente con agua para disipar el calor generado por el rozamiento entre la madera y la piedra. Debido a este calor generado, se alcanzan temperaturas en la zona de molido de hasta 150 °C, temperatura suficiente para fluidificar la lignina y permitir la separación de las fibras, las cuales pasan por unas ranuras situadas en la propia piedra de moler hacia un pozo que contiene agua, donde se forma la suspensión de fibras en agua. Esta pulpa es llevada hacia unas cribas donde se seleccionan los tamaños de partícula adecuados; las partículas no válidas se vuelven a moler en molinos mecánicos o se desechan definitivamente. Con este procedimiento se obtienen fibras celulósicas largas, pero recubiertas de una capa de lignina, pues por este procedimiento no es posible separarla definitivamente. Debido a esto, los rendimientos de pulpa a madera son muy altos, del orden del 90 al 95 %.

La pulpa obtenida por este proceso produce papeles de baja calidad, los cuales eran usados antiguamente para papeles de baja exigencia en términos de resistencia mecánica y blancura, como eran los papeles de periódico de principios de siglo. Hoy en día, este tipo de pulpa ha de ser mezclado con al menos un 25% de pulpa de alta resistencia (pulpa semiquímica). Una gran ventaja que presenta este proceso es la posibilidad de variación de la producción en función de la demanda, pues al ser un proceso tan simple, no existen grandes problemas a la hora de la puesta en marcha y parada del proceso, al contrario de los procesos de producción en cadena continua. Hoy en día, la producción a partir de pulpa a partir de este método es muy reducida, empleándose sobre todo en pequeñas instalaciones de carácter artesanal, sobre todo debido a las malas condiciones del papel confeccionado, pues en términos globales de costo total del kilo de pulpa producida es relativamente bajo, pues aunque el molido consume mucha energía, es el único gasto importante de este proceso, pues no entraña el gasto en reactivos químicos, equipos de recuperación de materia y energía, tratamiento

medioambiental de residuos producidos, como es el caso de otros métodos de origen químico<sup>22</sup>.

### **1.7.2 Método químico**

En el pulpeo o cocción química, la deslignificación se lleva a cabo con la ayuda de agentes químicos ácidos o básicos, en digestores o reactores a altas presiones y temperaturas. Las ligninas y las hemicelulosas se pierden, por lo que los rendimientos no pasan de entre 40 y 60%. Por otra parte, las fibras se blanquean mejor y son más resistentes y de mayor calidad. Los métodos químicos se dividen en ácidos o alcalinos dependiendo del pH del reactivo. Los primeros son procesos más fuertes donde la separación de la celulosa es mejor y se pueden aplicar para fines químicos y para obtener papeles de buena calidad. Tienen el inconveniente de no poder emplear maderas resinosas, pues a pH bajos los fenoles y ácidos de las resinas se condensan con la lignina formando complejos insolubles y coloreados que manchan la pasta. Por el contrario, en los métodos alcalinos, esas sustancias se eliminan en las lejías residuales en forma de sales o fenolatos solubles<sup>26</sup>.

#### **a) Proceso alcalino o al sulfato**

El procedimiento al sulfato produce una pasta más fuerte y oscura, y requiere la recuperación química para poder competir económicamente. Su punto de partida está en el procedimiento a la sosa (que utiliza únicamente hidróxido sódico para la digestión) y comenzó a adquirir importancia en la industria del decenio de 1930 al de 1950 con el desarrollo del blanqueo por dióxido de cloro y la implantación de procedimientos químicos de recuperación, que también producen vapor y energía para la fábrica. También desempeñó un papel importante el desarrollo de los metales anticorrosión, como el acero inoxidable, para manejar el entorno ambiental de las fábricas de pasta ácida y de pasta alcalina.

La mezcla de cocción (licor blanco) es hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ ) y sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). La moderna pasta kraft se transporta generalmente en digestores continuos con frecuencia revestidos de acero inoxidable. La temperatura del digestor se sube lentamente hasta unos  $170\text{ }^\circ\text{C}$  y se mantiene a ese nivel durante 3 ó 4 horas. La pasta (llamada “parda”, por su color) se tamiza para separar los trozos de madera que hayan quedado sin digerir, se lava para separar la mezcla de cocción utilizada (ahora licor negro) y se envía o a la nave de blanqueado o a la de la máquina de producción de pasta. La madera sin digerir se devuelve al digestor o a la caldera para quemarla y producir energía<sup>26</sup>.

El licor negro recogido del digestor y el “papel pardo” de los lavaderos contiene sustancias orgánicas disueltas cuya composición química exacta depende de las características de la especie de la madera y de las condiciones de la cocción. El licor se concentra por evaporación hasta que su contenido en agua es inferior al 40 %, y se pulveriza en la caldera de recuperación. La parte orgánica se consume como combustible, generando calor que se recupera en la parte superior del horno en forma de vapor a elevada temperatura. La parte inorgánica no quemada se recoge en el fondo de la caldera como una mezcla fundida. El fundido fluye fuera del horno y se disuelve en una solución cáustica débil, obteniéndose un “licor verde” que contiene principalmente  $\text{Na}_2\text{S}$  disuelto y carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Este licor se bombea a una planta de recaustificación, donde se clarifica y entonces reacciona con cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), formando  $\text{NaOH}$  y carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ). El licor blanco se filtra y se almacena para su uso. El  $\text{CaCO}_3$  se envía a un horno de cal, donde se calienta para regenerar cal viva ( $\text{CaO}$ )<sup>26</sup>.

## **b) Proceso al sulfito**

El procedimiento al sulfito dominó la industria papelera desde finales del siglo XIX hasta mediados del XX, si bien estaba limitado por los tipos de madera utilizables y por la contaminación creada al eliminar el licor residual sin tratar en los cauces. Procedimientos posteriores soslayaron muchos de aquellos problemas, pero la pasta elaborada al sulfito representa actualmente tan sólo un pequeño segmento

del mercado de la pasta. Aunque suele utilizarse la digestión en medio ácido, existen variantes en las que se emplean un medio neutro o un medio básico.

El licor de cocción de ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) e ion bisulfito ( $\text{HSO}_3^-$ ), se prepara in situ. Se quema azufre elemental para producir dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que se hace pasar a través de una torre de absorción que contiene agua y una de las cuatro bases alcalinas ( $\text{CaCO}_3$ , el sulfito original,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) o hidróxido amónico ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) que producen el ácido y el ion y controlan sus proporciones. Normalmente, la pasta al sulfito se carga en digestores discontinuos revestidos de ladrillos. Para evitar reacciones no deseadas, los digestores se calientan lentamente hasta una temperatura máxima de 130 a 140 °C, y las astillas se cuecen durante mucho tiempo (6 a 8 horas). Al aumentar la presión del digestor, el dióxido de azufre gaseoso ( $\text{SO}_2$ ) se purga y se vuelve a mezclar con el ácido de la cocción. Cuando quedan aproximadamente de 1 a 1.5 horas de cocción, se interrumpe la calefacción y se disminuye la presión extrayendo gas y vapor de agua. La pasta se descarga en un tanque, se lava y criba.

La mezcla usada en la digestión, llamada licor rojo, se puede utilizar para recuperar calor y productos químicos en todos los procedimientos menos en el que tiene como base bisulfito sódico. Para la pasta al sulfito amónico, el licor rojo diluido se deja primero para eliminar el  $\text{SO}_2$  residual, se concentra y se quema. El gas que sale contiene  $\text{SO}_2$  se enfría y se pasa a través de una torre de absorción en la que se combina con amoníaco para regenerar el licor de cocción. Finalmente, el licor se filtra, se refuerza con  $\text{SO}_2$  y se almacena. El amoníaco no se puede recuperar porque se transforma en nitrógeno y agua en la caldera de recuperación.

En la pasta al sulfito de magnesio, al quemar el licor concentrado se obtiene óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y  $\text{SO}_2$ , que se recuperan fácilmente. No se produce fusión en este proceso; se recoge bastante  $\text{MgO}$  del escape de gas y se apaga con agua para producir hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). El  $\text{SO}_2$  se enfría y se combina con el  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  en una torre de absorción para reconstituir el licor de cocción. El bisulfito de magnesio ( $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$ ) se refuerza con  $\text{SO}_2$  y se almacena. Es posible una recuperación del 80 al 90 % de los reactivos de cocción<sup>26</sup>.



La recuperación del licor de cocción de la base de sulfito sódico es más complicada. Se incinera el licor de cocción concentrado utilizado y aproximadamente el 50 % del azufre se transforma en  $\text{SO}_2$ . El resto de azufre y de sodio se recoge del fondo de la caldera de recuperación como una fusión de  $\text{Na}_2\text{S}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Ésta se disuelve para producir licor verde, que se transforma en bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) en varios pasos. El  $\text{NaHSO}_3$  se refuerza y se almacena. El proceso de recuperación produce algunos gases sulfurados, en particular sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )<sup>26</sup>.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

El material que se utilizó como materia prima para la elaboración del papel fueron las hojas de la panta de chayote, correspondiente a la especie *Sechium Edule* y su utilización se definió a partir de sus características morfológicas, fisiológicas y fenológicas, además de su composición química, lo cual nos permitió su utilización.

No obstante, se utilizaron diferentes materiales que nos ayudaron a la obtención de una adecuada pulpa celulósica, así como en el proceso de elaboración de las hojas de papel, e incluso para evaluar algunas propiedades cualitativas del mismo.

*Material utilizado para la obtención de la pulpa celulósica a nivel laboratorio y planta piloto:*

- Recipiente metálico de 6 L
- Digestor instalado en la Nave 1000 de Ingeniería Química
- Licuadora
- Termómetro
- Parrilla eléctrica
- Recipiente de plástico de 19 L
- Vaso de precipitados de 1 L
- Manta de cielo

-Sustancias:

- Hidróxido de sodio (NaOH) al 10% y 15%
- Agua ( $H_2O$ )
- Cloro comercial
- Ácido muriático

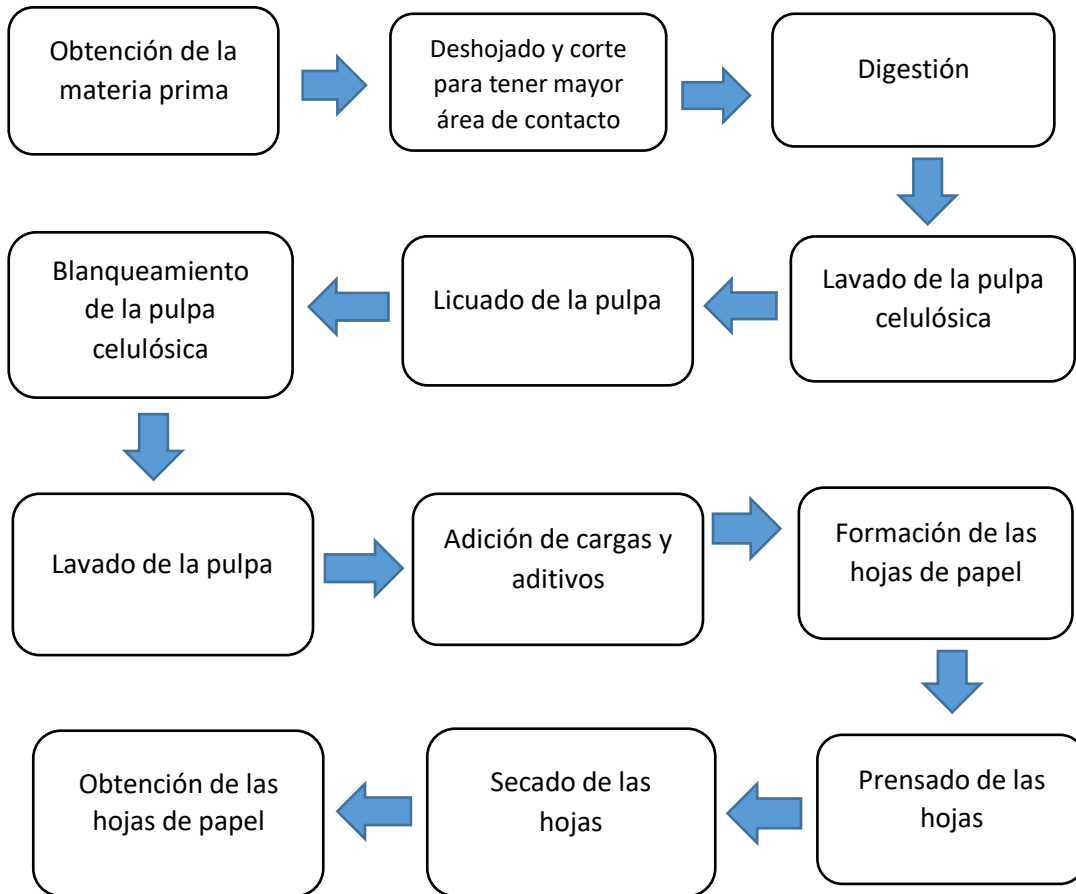
*Material utilizado para la formación de las hojas de papel a nivel laboratorio y planta piloto:*

- Bastidor
- Papel pellón
- Tina de plástico
- Balanza analítica
- Espátula
- Prensa mecánica
- Vaso de precipitados de 50 mL
- Resistol blanco
- Carbonato de calcio ( $CaCO_3$ )
- Agua ( $H_2O$ )
- Esponja

*Material utilizado para la evaluación de las propiedades cualitativas del papel formado:*

- Agitador de vidrio
- Tijeras
- Vasos de precipitados de 50 mL
- Vernier
- Balanza analítica
- Gotero
- Vidrios de reloj
- Potenciómetro
- Medidor de humedad

## 2.2 Diagrama de bloques del proceso



## 2.3 Experimentación

Es importante mencionar que para la obtención de la pulpa celulósica no maderable se llevó a cabo un proceso semiquímico de producción de pulpa alcalina a la sosa, en donde dicha experimentación se llevó a cabo a nivel laboratorio y a nivel planta piloto en donde las condiciones de operación (Tiempo de cocción y concentración del licor) fueron variando. El tiempo de cocción estuvo representado por los tiempos de 2 horas y de 3.45 horas para nivel laboratorio, no obstante, para nivel planta piloto los tiempos fueron de 15 min y 40 min. Por otro lado la concentración de licor de cocción estuvo representada por las concentraciones de 10% y 15% donde lo que se utilizó fue sosa caustica comercial. Por otro lado, la cantidad de hojas de chayote utilizadas para la experimentación fueron de 2 kg y 1.600 kg para las dos

corridas a nivel laboratorio, y para nivel planta piloto se utilizaron 1.200 kg y 3.600 kg

Es importantes resaltar que estas condiciones de operación tuvieron aplicabilidad para cuatro corridas.

### **2.3.1 Descripción del proceso a nivel laboratorio para la formación de las hojas de papel**

#### **i. Obtención de materia prima**

La materia prima utilizada para la elaboración de las hojas de papel son las hojas de chayote (*Sechium Edule*), las cuales fueron recolectadas de una enredadera ubicada en el jardín de una casa de Valle Dorado en el Estado de México.



° **Figura 3.** Obtención de las hojas de chayote.

#### **ii. Deshojado y corte**

Para obtener una mayor área de contacto se cortaron con tijeras las hojas en pequeños trozos (Figura 4) para así facilitar una mejor cocción. Cabe mencionar que se hicieron dos corridas, una al 10% y otra al 15%, por lo que para la del 10% se utilizaron 1.600 kg de materia prima, y para la del 15% 2 kg.



**Figura 4.** Corte de las hojas de chayote.

### **iii. Digestión**

-Primera corrida al 10%: Se colocaron los 1.600 kg de materia en la solución de sosa caustica (De acuerdo a los cálculos realizados se utilizaron 500 g de NaOH en 5 L de agua) a una temperatura de 85 °C durante 3:45 hrs. (Figura 5).

-Segunda corrida al 15%: Se colocaron 2 kg de hojas de chayote en la solución de sosa cáustica (En base a los cálculos se utilizaron 750 g de NaOH en 5 L de agua) a una temperatura de 90 °C durante 2 h (Figura 6).



**Figura 5.** Digestión al 10%



**Figura 6.** Digestión al 15%

### **iv. Lavado de la pulpa celulósica**

Se separaron ambas pulpas del líquido (licor) con ayuda de manta de cielo, la cual sirvió como filtro para evitar que en el licor quedaran residuos de la misma. Posteriormente se lavó con agua hasta que la pulpa no tuviera una textura jabonosa, lo cual nos indicaba que ya no había residuos de NaOH.



**Figura 7.** Pulpa lavada al 10%



**Figura 8.** Pulpa lavada al 15%

#### **v. Licuado de la pulpa celulósica**

Para ambas pulpas se hizo una prueba para ver si las fibras aún estaban gruesas, la cual consistió en poner un poco de pulpa en un vaso de precipitados con agua, en donde al mirar a contra luz se notaban las fibras (Figura 9), por lo que en ambos resultados de las pruebas resultó que éstas estaban aún gruesas y largas, por lo que se procedió a licuarlas en intervalos de 5 a 6 segundos, para que estas tuvieran una consistencia más fina (Figura 10).



**Figura 9.** Vista de las fibras a contra luz



**Figura 10.** Licuado de la pulpa

#### vi. **Blanqueamiento de la pulpa celulósica**

Como se muestra en las figuras anteriores, la pulpa tenía un color verdoso, por lo que se procedió al blanqueamiento de ambas pulpas con ayuda de hipoclorito de sodio (Blanqueador/ cloro de uso comercial), agregando 4 L del blanqueador a cada una de ella, y se dejaron reposar 2 días (Figura 11).



**Figura 11.** Blanqueamiento de la pulpa celulósica al 10%

#### vii. **Segundo lavado de la pulpa celulósica**

Al pasar los dos días, la pulpa de ambas corridas era ya blanquecina, por lo que se tenía que lavar nuevamente con agua para quitar el cloro que se había añadido para blanquear. Se tamizaron ambas pulpas celulósicas con la manta de cielo (Figura 12), y se colocaron en agua limpia, repitiendo el proceso hasta que el agua tuviera un pH= 7.



**Figura 12.** Segundo lavado de la pulpa celulósica

### **viii. Adición de cargas y aditivos**

Posteriormente al segundo lavado se agregaron las cargas y aditivos.

-Primera corrida al 10%: Se agregaron 5 mL de Resistol líquido, y 8 g de  $CaCO_3$

-Segunda corrida al 15%: Se agregaron 8 mL de Resistol líquido y 6 g de  $CaCO_3$

### **ix. Formación de las hojas de papel**

Al término de los pasos anteriores se procedió a realizar las hojas de papel con ayuda de bastidores y papel pellón, donde se tamizó la pulpa dentro del bastidor y se esperó a que el agua se drenara, quedando solo la pulpa en el papel pellón, dando así la forma de la hoja de papel (Figura 13).



**Figura 13.** Formación de las hojas de papel en bastidores.

### **ix. Prensado**

Al término de la realización de las hojas de papel se notó que éstas contenían demasiada humedad, por lo que se metieron a la prensa mecánica (Figura 15), y ahí se dejaron varios días. Cabe mencionar que este proceso fue tardado, ya que las hojas eran revisadas y secadas una vez al día al aire libre por intervalos de aproximadamente 1 a 2 horas (Figura 14), y metidas nuevamente a la prensa, esto con el fin de que las hojas se deformarán y evitar así la generación de hongos en las mismas.





**Figura 14.** Secado de las hojas al aire libre



**Figura 15.** Prensado de las hojas de papel

### **xi. Secado de las hojas**

Teniendo las hojas ya casi secas se procedió a retirarlas por completo de la prensa para secarlas con ayuda del sol poniendo peso sobre ellas para evitar la deformación de las mismas (Figura 16).



**Figura 16.** Secado final de la hoja de papel ya con bajo contenido de humedad

### **xii. Obtención de las hojas de papel**

Finalmente se retiraron las hojas de papel del pellon y se le dieron forma más simétrica con ayuda de una guillotina.

-Primera corrida 10% : Se obtuvieron 9 hojas de papel (Figura 17).

-Segunda corrida al 15% : Se obtuvieron 6 hojas de papel (Figura 18).



**Figura 17.** Obtención de hojas de papel al 10%



**Figura 18.** Obtención de hojas de papel al 15%

### **2.3.2 Descripción del proceso a nivel planta piloto para la formación de las hojas de papel**

#### **i. Obtención de la materia prima**

Como ya se mencionó anteriormente, la materia prima que se utilizó para la elaboración de papel fueron las hojas de chayote (Figura 19), las cuales de igual manera fueron recolectadas del jardín de una casa de Valle Dorado en el Estado de México.



**Figura 19.** Obtención de las hojas de chayote

#### **ii. Deshojado y corte**

Para tener una mejor cocción se cortaron en trozos pequeños las hojas de chayote (Figura 20). Cabe mencionar que también se hicieron dos corridas a nivel planta piloto a dos diferentes concentraciones de licor, una al 10% y otra al 15%, en donde para la de 10% se utilizó un total de 1.200 kg de materia prima, y para la del 15% se ocuparon 3.600 kg.



**Figura 20.** Hojas de Chayote cortadas en trozos pequeños

### iii. Digestión

A diferencia del procedimiento anterior, para la digestión de ambas corridas se utilizó el digestor instalado en la Nave 1000 de Ingeniería química (Figura 21), el cual tuvo como propósito reducir el tiempo de digestión.

-Primera corrida al 10%: Se colocaron 1.200 kg de hoja de chayote dentro del digestor, y posteriormente se agregó la solución de NaOH (De acuerdo a los cálculos se utilizaron 1.300 kg de NaOH en 13 L de agua), a una temperatura de 115 °C, una presión de vapor de 1.2  $kg/cm^2$ , y una presión en el digestor de 1.3  $kg/cm^2$ , en un tiempo de 40 min.

-Segunda corrida al 15%: Se colocaron los 3.600 kg de hoja de chayote en el digestor y se le agregó la solución de NaOH (Se utilizaron 1.5 kg de NaOH en 10 L de agua), a una temperatura de 112 °C, una presión de vapor de 1.2  $kg/cm^2$ , y una presión en el digestor de 1.15  $kg/cm^2$ , en un tiempo de 15 min.



**Figura 21.** Digestor Instalado en la Nave 1000 de I.Q.



**Figura 22.** Vista del proceso de digestión

#### iv. Obtención de la pulpa celulósica

Pasado el tiempo de cocción, la pulpa fue retirada del digestor con ayuda de recipientes de plástico (Figura 23).

NOTA: Al término de este proceso, se cerraron todas las válvulas del digestor y se procedió a recircular agua helada para enfriar el reactor y proceder a su limpieza.



**Figura 23.** Obtención de la pulpa celulósica

#### v. Lavado de la pulpa celulósica

Para ambas corridas se realizó el mismo procedimiento. Se separó la pulpa del licor con ayuda de manta de cielo para posteriormente lavarla con agua (Figura 24) hasta que ésta no tuviera una consistencia jabonosa, y el licor obtenido se resguardo en recipientes de plástico para su posterior tratamiento.



**Figura 24.** Lavado de la pulpa celulósica

#### vi. Blanqueamiento de la pulpa celulósica

Como ya se mostró anteriormente, la pulpa obtenida en ambas corridas tenía una coloración verdosa, por lo que se blanqueó con hipoclorito de sodio (Blanqueador/cloro comercial). Se utilizaron 4 L de cloro para cada corrida y se dejaron en reposo 2 días (Figura 25).



**Figura 25.** Blanqueamiento de la pulpa celulósica.

**vii. Segundo lavado de la pulpa celulósica**

Con la finalidad de quitar el cloro añadido se realizó un segundo lavado de ambas pulpas, en donde se separó la pulpa con ayuda de la manta de cielo y se colocó en agua limpia (Figura 26), repitiendo el mismo proceso hasta que el agua tuviera un pH neutro y no básico.



**Figura 26.** Segundo lavado de la pulpa celulósica.

**viii. Adición de cargas y aditivos**

-Primera corrida al 10%: Se le agregaron 10 g de  $CaCO_3$  y 12 mL de resistol blanco.

-Segunda corrida al 15%: Se agregaron 6 g de  $CaCO_3$  y 8 mL de resistol blanco.

**ix Formación de las hojas**

Con ayuda de bastidores y papel pellón se tamizó la pulpa en ellos (Figura 27), drenando en agua que quedaba en ellos con ayuda de una esponja.





**Figura 27.** Formación de las hojas de papel.

**x. Prensado de las hojas**

En este paso aún las hojas contenían agua, por lo que se metieron a una prensa mecánica (Figura 28), en donde se revisaron diariamente y sacaron para cambiarles el papel pellón y así evitar el crecimiento de hongos en las mismas.



**Figura 28.** Prensado de las hojas.

**xi. Secado de las hoja.**

En este paso las hojas ya estaban casi secas, por lo que se colocaron a la intemperie para que con ayuda del sol se terminaran de secar, no obstante, cabe mencionar que se colocó peso en ellas para evitar que se deformarán (Figura 29).



**Figura 29.** Secado de las hojas de papel

## xii. Obtención de las hojas de papel

Por último se retiraron las hojas del papel pellón, y con ayuda de una guillotina se le dio a cada una de ellas una forma más simétrica.

-Primera corrida al 10%: Se obtuvieron 14 hojas (Figura 30).

-Segunda corrida al 15%: Se obtuvieron 10 hojas (Figura 31).



**Figura 30.** Hojas obtenidas al 10%



**Figura 31.** Hojas obtenidas al 15%

## 2.3.3 Tratamiento de residuos

### i. Resguardo de reiduos (Licor).

Al momento de que el proceso de digestión termina, como se mencionó con anterioridad la pulpa es separada del licor, por lo que dicha sustancia fue resguardada en cubetas etiquetadas y tapadas para evitar accidentes.



## **ii. Neutralización.**

La neutralización se realizó con ácido muriático comercial, ya que el licor era demasiado básico, teniendo un pH de 14, y lo que se buscaba era que está tuviera un pH neutro por lo que para realizar este procedimiento, las cubetas que contenían los licores fueron sacadas a la interperie para agregar el ácido muriático, en donde en este paso fue importante mover con un agitador la mezcla e ir midiendo el pH con ayuda de un conductímetro hasta lograr un pH=7

## **iii. Desecho de los residuos.**

Finalmente, teniendo un pH de 7, se procedió a desechar los residuos en la coladera, y se lavarón con jabón las cubetas para evitar que éstas quedaran sucias y así se pudieran utilizar posteriormente.

## **3.RESULTADOS**

### **3.1 Caracterización de las hojas de papel**

Como se mencionó con anterioridad, se realizaron cuatro corridas, dos a nivel laboratorio, y dos a nivel planta piloto a concentraciones del 10% y %15 de NaOH.

-Corridas a nivel laboratorio:

- Al 10%: Se obtuvieron 9 hojas de papel con 1.600 kg de materia prima.
- Al 15%: Se obtuvieron 6 hojas de papel con 2 kg de hojas de chayote.

-Corridas a nivel planta piloto:

- Al 10%: Se obtuvieron 14 hojas de papel con 1.200 kg de materia prima.
- Al 15%: Se obtuvieron 10 hojas de papel con 3.600 kg de hojas de chayote.

Es importante mencionar que todas las hojas obtenidas no eran del mismo tamaño, por lo que no era posible tener una medida exacta de cada una de ellas. No obstante, a continuación se muestran los resultados de la caracterización de cinco hojas tomadas al azar para cada corrida.

Es importante resaltar que por fines prácticos, para realizar la caracterización de ellas se cortaron cuadros de 5 cm x 5 cm.

### 3.1.1 Espesor

Para esta propiedad, fue de gran utilidad basarse en la norma **NMX-N-009-SCFI-2005 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL – ESPESOR Y PESO ESPECÍFICO DE PAPELES Y CARTONCILLOS - MÉTODO DE PRUEBA (ANCELA A LA NMX-N-009-1988)** (Anexo 1), en donde con ayuda de un vernier digital (Figura 32) se midieron tres puntos diferentes de la superficie de la hoja (Figura 33), los cuales se reportaron en mm.



**Figura 32.** Vernier Digital.



**Figura 33.** Medición del espesor de las hojas de papel.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 5.** Espesor de las hojas de papel a nivel laboratorio a una concentración de licor del 10%

	Espesor 1 (mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Promedio (mm)
<b>Hoja 1</b>	0.94	0.85	0.97	0.92
<b>Hoja 2</b>	0.87	0.76	0.98	0.87

<b>Hoja 3</b>	0.64	0.58	0.70	0.64
<b>Hoja 4</b>	0.78	0.85	0.84	0.82
<b>Hoja 5</b>	0.55	0.46	0.37	0.46

**Tabla 6.** Espesor de las hojas de papel a nivel laboratorio a una concentración de licor del 15%

	<b>Espesor 1 (mm)</b>	<b>Espesor 2 (mm)</b>	<b>Espesor 3 (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>
<b>Hoja 1</b>	0.79	0.76	1.29	0.94
<b>Hoja 2</b>	0.66	0.57	0.92	0.71
<b>Hoja 3</b>	0.75	0.74	0.80	0.76
<b>Hoja 4</b>	0.83	0.86	0.74	0.81
<b>Hoja 5</b>	1.01	0.98	0.99	0.99

**Tabla 7.** Espesor de las hojas de papel a nivel planta piloto a una concentración de licor del 10%

	<b>Espesor 1 (mm)</b>	<b>Espesor 2 (mm)</b>	<b>Espesor 3 (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>
<b>Hoja1</b>	1.17	1.37	1.09	1.21
<b>Hoja 2</b>	0.93	1.14	0.82	0.96
<b>Hoja 3</b>	0.94	0.88	0.86	0.89
<b>Hoja 4</b>	1.16	1.30	1.37	1.27
<b>Hoja 5</b>	1.15	1.08	1.85	1.36

**Tabla 8.** Espesor de las hojas de papel a nivel planta piloto a una concentración de licor del 15%

	<b>Espesor 1 (mm)</b>	<b>Espesor 2 (mm)</b>	<b>Espesor 3 (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>
<b>Hoja 1</b>	1.74	1.82	1.41	1.65
<b>Hoja 2</b>	1.28	1.29	1.18	1.25
<b>Hoja 3</b>	1.83	1.76	1.52	1.70
<b>Hoja 4</b>	1.14	1.33	1.46	1.31
<b>Hoja 5</b>	1.78	1.53	1.59	1.63

### 3.1.2 Peso base

Esta propiedad también es conocida como gramaje. El término alude al peso del papel por metro cuadrado, expresado en gramos<sup>19</sup>.

Para la determinación del peso base también existe una norma mexicana, la **NMX-N-001-SCFI-2011. INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL - DETERMINACIÓN DEL GRAMAJE O PESO BASE DEL PAPEL, CARTONCILLO Y CARTÓN (PESO POR UNIDAD DE ÁREA) - MÉTODO DE PRUEBA (ANCELA A LA NMX-N-001-SCFI-2005)** (Anexo 1), la cual se consultó previamente.

Como se mencionó anteriormente, cada hoja fue cortada en cuadrados de 5 cm por 5 cm, esto con la finalidad de poder pesar cada muestra en la balanza analítica (Figura 34). Los resultados se muestran a continuación. La ecuación 2 fue utilizada para obtener el peso base (Anexo 2).



**Figura 34.** Medición del peso de las hojas de papel.

**Tabla 9.** Peso base de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%

	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso base (g/m <sup>2</sup> )	Peso base ( g/cm <sup>2</sup> )
Hoja 1	1.4305	25	572.2	0.05722
Hoja 2	1.355	25	542	0.05422
Hoja 3	0.812	25	324.8	0.03248
Hoja 4	1.007	25	402.8	0.04028
Hoja 5	0.4417	25	176.68	0.01768

**Tabla 10.** Peso base de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%

	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso base (g/m <sup>2</sup> )	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )
Hoja 1	2.8498	25	1139.92	0.113992
Hoja 2	1.872	25	748.8	0.07488
Hoja 3	2.1134	25	845.36	0.084536
Hoja 4	2.4439	25	977.56	0.097756
Hoja 5	2.4864	25	994.56	0.099456

**Tabla 11.** Peso base de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%

	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso base (g/m <sup>2</sup> )	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )
Hoja 1	3.0644	25	1225.76	0.122576
Hoja 2	2.0852	25	834.08	0.083408
Hoja 3	1.8188	25	727.52	0.072752
Hoja 4	3.0275	25	1211	0.1211
Hoja 5	3.0173	25	1206.92	0.120692

**Tabla 12.** Peso base de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%

	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso base (g/m <sup>2</sup> )	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )
Hoja 1	3.0708	25	1228.32	0.122832
Hoja 2	2.1805	25	872.2	0.08722
Hoja 3	3.1972	25	1278.88	0.127888
Hoja 4	2.0637	25	825.48	0.082548
Hoja 5	2.5532	25	1021.28	0.102128

### 3.1.3 Densidad aparente

La densidad absoluta se refiere a la relación entre la masa y el volumen de la materia que la constituye. Pero esta densidad pequeña debido a la estructura porosa del papel no tiene interés para las artes gráficas, por lo que se habla de la densidad aparente, la cual incluye como volumen los espacios entre las fibras. Así la densidad aparente será la masa del papel respecto al volumen aparente del mismo. Lo que indica cuanto compacto es el papel. La densidad determina propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas. Se obtiene dividiendo el gramaje entre el espesor<sup>23</sup>.

Para la realización de los cálculos se utilizó la ecuación 3 (Anexo 2), en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 13.** Densidad aparente de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%.

	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )	Espesor (mm)	Espesor (cm)	$\delta A$ (g/cm <sup>3</sup> )
Hoja 1	0.05722	0.92	0.092	0.621956522
Hoja 2	0.0542	0.87	0.087	0.622988506
Hoja 3	0.03248	0.64	0.064	0.5075
Hoja 4	0.04028	0.82	0.082	0.491219512
Hoja 5	0.017668	0.46	0.046	0.384086957

**Tabla 14.** Densidad aparente de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%.

	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )	Espesor (mm)	Espesor (cm)	$\delta A$ (g/cm <sup>3</sup> )
Hoja 1	0.113992	0.946666667	0.094666667	1.204140845
Hoja 2	0.07488	0.716666667	0.071666667	1.044837209
Hoja 3	0.084536	0.763333333	0.076333333	1.107458516
Hoja 4	0.097756	0.81	0.081	1.206864198
Hoja 5	0.099456	0.993333333	0.099333333	1.0012349

**Tabla 15.** Densidad aparente de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%.

	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )	Espesor (mm)	Espesor (cm)	$\delta A$ (g/cm <sup>3</sup> )
Hoja 1	0.122576	1.21	0.121	1.013024793
Hoja 2	0.083408	0.963333333	0.096333333	0.86582699
Hoja 3	0.072752	0.893333333	0.089333333	0.81438806
Hoja 4	0.1211	1.276666667	0.127666667	0.948563968
Hoja 5	0.120692	1.36	0.136	0.887441176

**Tabla 16.** Densidad aparente de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%.

	Peso base (g/cm <sup>2</sup> )	Espesor (mm)	Espesor (cm)	$\delta A$ (g/cm <sup>3</sup> )
Hoja 1	0.122832	1.656666667	0.165666667	0.741440644
Hoja 2	0.08722	1.25	0.125	0.69776
Hoja 3	0.127888	1.703333333	0.170333333	0.750810176
Hoja 4	0.082548	1.31	0.131	0.630137405
Hoja 5	0.102128	1.633333333	0.163333333	0.62527347

### 3.1.4 Bulk (Volumen específico aparente)

El volumen específico o bulk, es la recíproca de la densidad, o sea, el volumen en  $\text{cm}^3$  de 1 gramo de papel. En algunos casos se acostumbra utilizar bulk, cuando se trata de papeles voluminosos, pero puede considerarse un equivalente de la densidad aparente y lo que influye en una, se aplica también a la otra. Esta propiedad es importante para los fabricantes de libros, ya que si hay variaciones de consideración, tendrán diferente grueso los libros, causando problemas en su encuadernación. También es una propiedad importante en papeles absorbentes y crepados<sup>9</sup>.

Se utilizó la ecuación 4 (Anexo 2) para la realización de los cálculos del volumen específico aparente, y los resultados son los siguientes:

**Tabla 17.** Bulk de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%.

Columna1	$\delta A$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Bulk ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
<b>Hoja 1</b>	0.621956522	1.60782943
<b>Hoja 2</b>	0.622988506	1.605166052
<b>Hoja 3</b>	0.5075	1.97044335
<b>Hoja 4</b>	0.491219512	2.035749752
<b>Hoja 5</b>	0.384086957	2.603577089

**Tabla 18.** Bulk de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%.

	$\delta A$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Bulk ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
<b>Hoja 1</b>	1.204140845	0.830467635
<b>Hoja 2</b>	1.044837209	0.957086895
<b>Hoja 3</b>	1.107458516	0.90296836
<b>Hoja 4</b>	1.206864198	0.828593641
<b>Hoja 5</b>	1.0012349	0.998766623

**Tabla 19.** Bulk de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%.

	$\delta A$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Bulk ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
<b>Hoja 1</b>	1.013024793	0.987142671
<b>Hoja 2</b>	0.86582699	1.154965151

<b>Hoja 3</b>	0.81438806	1.227915841
<b>Hoja 4</b>	0.948563968	1.054225159
<b>Hoja 5</b>	0.887441176	1.12683525

**Tabla 20.** Bulk de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%.

	$\delta A$ (g/cm <sup>3</sup> )	Bulk (cm <sup>3</sup> /g)
<b>Hoja 1</b>	0.741440644	1.348725631
<b>Hoja 2</b>	0.69776	1.433157533
<b>Hoja 3</b>	0.750810176	1.331894574
<b>Hoja 4</b>	0.630137405	1.586955468
<b>Hoja 5</b>	0.62527347	1.599300224

### 3.1.5 Contenido de humedad

La Norma utilizada fue la siguiente: **NMX-N-016-SCFI-2011. INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL- DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE LOS PAPELES Y CARTONES POR SECADO EN ESTUFA – MÉTODO DE PRUEBA.** (Anexo 1).

Para medir el contenido de humedad de las hojas se utilizó una termo-balanza (Figura 35), la cual secaba las hojas de papel y arrojaba directamente el valor del contenido de humedad de las mismas, por lo que para ello se cortaron trozos de papel que tuvieran un peso mayor a 0.5 g ya que éste era el valor mínimo que podía pesar la termo- balanza para su funcionamiento.





**Figura 35.** Medición del contenido de humedad de las hojas de papel.

Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 21.** Contenido de humedad de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%

	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>Hoja 1</b>	0.520	0.500	3.84
<b>Hoja 2</b>	0.520	0.498	4.23
<b>Hoja 3</b>	0.564	0.543	3.72
<b>Hoja 4</b>	0.526	0.505	3.99
<b>Hoja 5</b>	0.532	0.510	4.13

**Tabla 22.** Contenido de humedad de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%

	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>Hoja 1</b>	0.544	0.522	4.04
<b>Hoja 2</b>	0.514	0.494	3.89
<b>Hoja 3</b>	0.510	0.491	3.72
<b>Hoja 4</b>	0.530	0.509	3.96
<b>Hoja 5</b>	0.511	0.491	3.91

**Tabla 23.** Contenido de humedad de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%

	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>Hoja 1</b>	0.523	0.502	4.01
<b>Hoja 2</b>	0.521	0.501	3.83
<b>Hoja 3</b>	0.541	0.520	3.88
<b>Hoja 4</b>	0.517	0.496	4.06
<b>Hoja 5</b>	0.599	0.576	3.83

**Tabla 24.** Contenido de humedad de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%

	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>Hoja 1</b>	0.565	0.542	3.90
<b>Hoja 2</b>	0.505	0.485	3.96
<b>Hoja 3</b>	0.526	0.506	3.80

<b>Hoja 4</b>	0.516	0.496	3.87
<b>Hoja 5</b>	0.574	0.550	4.18

### 3.1.6 Resistencia a la superficie

La resistencia a la superficie es una propiedad del papel que hace referencia al daño que pudiera sufrir la superficie de una hoja debido a la fuerza de separarse de la mantilla durante el proceso de impresión.

Esta prueba no se pudo realizar, ya que para ello se tiene que hacer una prueba llamada simulación de impresión, pero se puede hacer en una impresora normal, sin embargo, las hojas de papel obtenidas no fueron maleables, y se corría el riesgo de que se rasgaran y quedaran atrapadas en la impresora por su gran rigidez, esto debido a que no son hojas de papel para impresión.

### 3.1.7 Encolado

En la norma **PROY-NMX-N-005-SCFI-2017. CELULOSA Y PAPEL – DETERMINACIÓN DEL ENCOLADO DEL PAPEL POR SU RESISTENCIA A LA TINTA (MÉTODO TIPO HÉRCULES) – MÉTODO DE PRUEBA. (CANCELARÁ A LA NMX-N-005-SCFI-2006)** (Anexo 1) nos indica un método para realizar la prueba de encolado, en donde se utiliza una solución acuosa de colorante oscuro como penetrante y un equipo especial para esta prueba, desafortunadamente no se contaba con esos materiales, por lo que la solución acuosa se reemplazó por agua destilada, la cual con ayuda de un gotero se hizo pasar en el trozo de papel y se midió el tiempo que tardaba en traspasar de una cara de la hoja a la otra (Figura 36). Y los resultados fueron los siguientes:



**Figura 36.** Determinación del encolado en las hojas de papel

**Tabla 25.** Determinación del encolado en las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%

	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo promedio (s)
<b>Hoja 1</b>	12	14	13
<b>Hoja 2</b>	12	16	14
<b>Hoja 3</b>	10	7	8.5
<b>Hoja 4</b>	10	8	9
<b>Hoja 5</b>	6	7	9.5

**Tabla 26.** Determinación del encolado en las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%

	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo promedio (s)
<b>Hoja 1</b>	50	53	51.5
<b>Hoja 2</b>	16	15	15.5
<b>Hoja 3</b>	17	19	18
<b>Hoja 4</b>	16	15	15.5
<b>Hoja 5</b>	21	28	24.5

**Tabla 27.** Determinación del encolado en las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%

	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo promedio (s)
<b>Hoja 1</b>	21	23	22

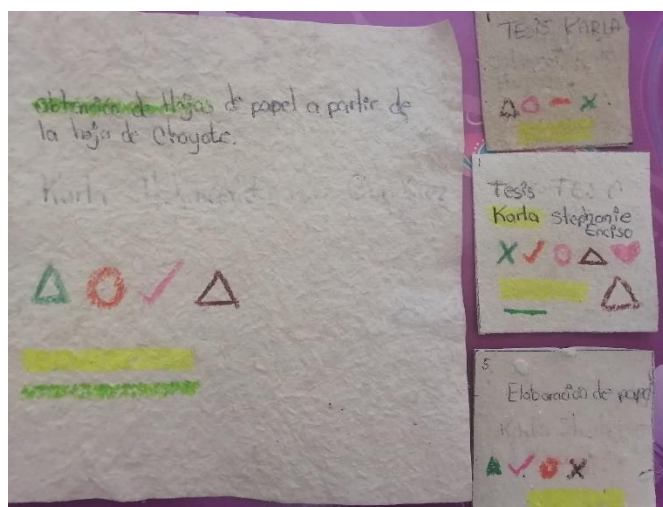
Hoja 2	10	14	12
Hoja 3	7	10	8.5
Hoja 4	15	18	16.5
Hoja 5	16	21	18.5

**Tabla 28.** Determinación del encolado en las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%

	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo promedio (s)
Hoja 1	17	11	14
Hoja 2	7	12	9.5
Hoja 3	51	55	53
Hoja 4	16	19	17.5
Hoja 5	13	18	15.5

### 3.1.8 Escritura

Para esta prueba se utilizó lápiz, bolígrafo, lápices de colores y marca textos para escribir sobre las hojas de papel (Figura 37) y ver como actuaba la tinta en ellas, si se corría o no, si pintaba o si era difícil escribir en ella. En el caso de la utilización del lápiz se procedió a escribir y a borrar el grafito. Las observaciones fueron las siguientes:



**Figura 37.** Escritura en las hojas de papel

**Tabla 29.** Observaciones de la prueba de escritura de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%

	<b>Bolígrafo</b>	<b>Lápiz</b>	<b>Lápices de colores</b>	<b>Marca textos</b>
<b>Hoja 1</b>	No se corre. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 2</b>	No se corre. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 3</b>	No se corre. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 4</b>	No se corre. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 5</b>	No se corre. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre

**Tabla 30.** Observaciones de la prueba de escritura de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%

	<b>Bolígrafo</b>	<b>Lápiz</b>	<b>Lápices de colores</b>	<b>Marca textos</b>
<b>Hoja 1</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 2</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 3</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre

<b>Hoja 4</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 5</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre

**Tabla 31.** Observaciones de la prueba de escritura de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%

	<b>Bolígrafo</b>	<b>Lápiz</b>	<b>Lápices de colores</b>	<b>Marca textos</b>
<b>Hoja 1</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 2</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 3</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 4</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 5</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente	No se corre. Difícil de colorear	No se corre

**Tabla 32.** Observaciones de la prueba de escritura de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%

	<b>Bolígrafo</b>	<b>Lápiz</b>	<b>Lápices de colores</b>	<b>Marca textos</b>

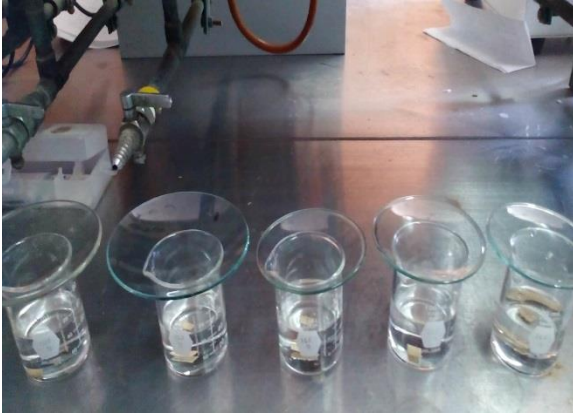
<b>Hoja 1</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente.	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 2</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente.	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 3</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente.	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 4</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir	Difícil de escribir. No se borra completamente.	No se corre. Difícil de colorear	No se corre
<b>Hoja 5</b>	No se corre la tinta. Difícil de escribir.	Difícil de escribir. No se borra completamente.	No se corre. Difícil de colorear	No se corre

### 3.1.9 pH

Para medir el pH de las hojas de papel, se utilizó un procedimiento indicado en la norma **NMX-N-011-1965 METODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PH EN PAPEL** (Anexo 1), en donde se cortaron cuadros de 1 cm x 1 cm que se colocaron en vasos de precipitado de 50 mL con 25 mL de agua destilada (Figura 38), se taparon con ayuda de un vidrio de reloj (Figura 39), y se dejaron reposar una hora. Pasado dicho tiempo se midió el pH con ayuda de un potenciómetro (Figura 40), y los resultados son los siguientes:



**Figura 38.** Vasos de precipitado llenos con agua destilada



**Figura 39.** Reposo de las hojas de papel.



**Figura 40.** Medición del pH.

**Tabla 33.** Determinación del pH de las hojas de papel a nivel laboratorio al 10%.

	pH inicial	pH final
<b>Hola 1</b>	7.73	8.93
<b>Hoja 2</b>	7.62	8.84
<b>Hoja 3</b>	7.66	8.76
<b>Hoja 4</b>	7.78	8.63
<b>Hoja 5</b>	7.78	8.67

**Tabla 34.** Determinación del pH de las hojas de papel a nivel laboratorio al 15%.

	pH inicial	pH final
<b>Hola 1</b>	7.75	8.46
<b>Hoja 2</b>	7.74	8.77
<b>Hoja 3</b>	8.11	8.66
<b>Hoja 4</b>	8.03	8.67
<b>Hoja 5</b>	8.19	8.53

**Tabla 35.** Determinación del pH de las hojas de papel a nivel planta piloto al 10%.

	pH inicial	pH final
<b>Hola 1</b>	7.97	8.25
<b>Hoja 2</b>	8.14	8.37
<b>Hoja 3</b>	8.24	8.43
<b>Hoja 4</b>	8.31	8.46



<b>Hoja 5</b>	8.33	8.47
---------------	------	------

**Tabla 36.** Determinación del pH de las hojas de papel a nivel planta piloto al 15%.

	<b>pH inicial</b>	<b>pH final</b>
<b>Hola 1</b>	8.52	8.73
<b>Hoja 2</b>	8.49	8.68
<b>Hoja 3</b>	8.47	8.64
<b>Hoja 4</b>	8.47	8.64
<b>Hoja 5</b>	8.48	8.63

## **4. RESULTADO Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Condiciones de operación óptimas para obtener un buen rendimiento**

A nivel laboratorio para una concentración de licor del 10% y una materia prima utilizada de 1.600 kg (hojas de chayote) se obtuvieron 9 hojas, con un tiempo de cocción de 3.45 h y a una temperatura de 85 °C. Mientras que para una concentración del 15% y 2 kg de hojas de chayote se obtuvieron 6 hojas, con un tiempo de cocción de 2 h y una temperatura de 90 °C.

A nivel planta piloto, para una concentración de NaOH al 10% y 1.200 kg de materia prima se lograron hacer 14 hojas, con un tiempo de cocción de 40 minutos y una temperatura de 115 °C, y para una concentración de licor del 15% y 1.5 kg de hojas de chayote se obtuvieron 10 hojas, con un tiempo de cocción de 15 minutos a una temperatura de 112 °C

Los resultados mencionados anteriormente, nos indican que las condiciones de operación óptimas para tener un buen rendimiento son sin duda las que se utilizaron a nivel planta piloto, específicamente a una concentración del 10% y un tiempo de 40 minutos, ya que en este proceso se suministró el calor necesario para acelerar el tratamiento químico de la materia prima (hojas de chayote). Es importante mencionar sin duda, que este proceso es similar, pero a pequeña escala al proceso Kraft, en donde se utilizan grandes digestores para obtener fibras suaves llamadas

pulpa, por lo que este proceso se asemeja más al utilizado en la industria en comparación con el realizado a nivel laboratorio. Sin embargo, a pesar de que las concentraciones a nivel laboratorio fueron las mismas y la materia prima fue igual aunque variando la cantidad y el tiempo de cocción, es evidente observar que el rendimiento fue menor y la calidad final de las hojas fue bajo en comparación con las obtenidas a nivel planta piloto, ya que las hojas que se realizaron en el laboratorio fueron un poco más delgadas y menos resistentes, ya que la pulpa obtenida recibió un proceso de desfibración de manera mecánica (licuadora) para separar las fibras, ya que a pesar de tener un tiempo de cocción de más de 2 h y Temperaturas de 85 °C y 90 °C, las fibras no se separaban, lo cual provocó descomposición de las fibras por el tiempo prolongado en que se llevó la digestión, y hojas de papel más delgadas por la pulpa fina obtenida. Y para la pulpa que se obtuvo por medio del digestor no hubo un tratamiento de desfibración ya que las fibras gracias a la presión de vapor se separaron correctamente, teniendo así una pulpa de calidad.

#### **4.2 Comparación de la metodología a nivel laboratorio y a nivel planta piloto**

Sin duda, ambos procesos son diferentes en cuanto a la obtención de la pulpa, después de ello el proceso es igual para los dos casos. Lo que varía es la temperatura, el tiempo de cocción y la cantidad de materia prima, y sin duda el medio en el que se realiza la digestión. A nivel laboratorio se necesitaron temperaturas muy altas y un recipiente amplio con tapa para introducir la materia (hojas chayote) y el licor, sin embargo, es importante resaltar que el tiempo de cocción fue muy alto, de 2 y 3.45 h Aquí la digestión no tiene más variables que la temperatura, el tiempo y la concentración. Por otro lado, en el digestor se necesitaron temperaturas más bajas, 115 °C y 112 °C, y un tiempo de cocción menor a 1 h, no obstante, en este proceso se añadieron dos variables más, la presión de vapor que fue constante en ambas corridas (1.2 kg/cm<sup>2</sup>) y la presión en el digestor, que de igual manera fue constante (1.3 kg/cm<sup>2</sup> y 1.15 kg/cm<sup>2</sup>, teniendo una diferencia de 0.15). Esto nos muestra que sin duda, para la obtención de la pulpa es recomendable realizarlo en un digestor a presión, ya que esta variable es

importante para que la solución de NaOH disuelva la lignina y libere las fibras celulósicas de manera más rápida, optimizando así más el proceso y obteniendo un mayor rendimiento. No obstante, si bien es importante hacer un análisis de la calidad de las hojas en ambos procesos: Las hojas obtenidas a nivel laboratorio tienen pliegues rugosos y no son muy uniformes a comparación de las hojas obtenidas a nivel planta piloto, ya que éstas son más lisas y un poco más uniformes, esto debido a la calidad de la pulpa obtenida. Ambos procesos son viables para la obtención de pulpa por medio de fibras no maderables, sin embargo, es importante tener en cuenta que hay una diferencia notable en el rendimiento de ambos procesos, y en la calidad de la pulpa.

#### **4.3 Resultados de la evaluación de propiedades generales, físicas y mecánicas de las hojas de papel**

Epson, una compañía japonesa reporta<sup>10</sup> que el espesor de una hoja de papel de calidad es entre 0.08 y 0.11 mm, no obstante, el espesor de las hojas de papel obtenidas a nivel laboratorio van de 0.46 a 0.99 mm (Tabla 5 y 6), y las obtenidas a nivel planta piloto van de 0.89 a 1.70 mm (Tabla 7 y 8), lo cual nos muestra que hay una diferencia notable en cuanto a lo reportado, lo que nos indica que las hojas de chayote son más gruesas, aunque es importante mencionar que existen en el mercado hojas con diferentes espesores para distintos usos.

El peso base, o también conocido como gramaje es una propiedad importante, ya que esto nos va a indicar que tan prensada esta una hoja. Para ello es importante conocer el rango de gramaje en el que están algunos papeles. Una hoja de papel seda o papel de fumar tiene un gramaje de unos 12-25 g/m<sup>2</sup>, los periódicos se imprimen en papel de unos 42 g/m<sup>2</sup>, mientras que el papel convencional de oficina tiene un gramaje de 80 g/m<sup>2</sup>. Por otro lado, el gramaje de las cartulinas comienza en 180 o 200 g/m<sup>2</sup>. Las cartulinas más gruesas y resistentes pueden llegar a tener un gramaje de 350 g/m<sup>2</sup> y son excepcionalmente resistentes y rígidas.<sup>23</sup> Las hojas de papel obtenidas a

nivel laboratorio tienen un rango de 324.8 a 1139.92 g/m<sup>2</sup> (Tabla 9 y 10), mientras que las obtenidas a nivel planta piloto van de 727.57 a 1278.88 g/m<sup>2</sup> (Tabla 11 y 12), lo cual nos indica que las hojas son de gramaje alto, por tanto es un papel resistente y grueso el que se obtuvo.

El contenido de humedad en las hojas de papel es una propiedad importante, ya que un exceso de ella provocará una descomposición del papel y las tintas, mientras que la falta de humedad provocará la deshidratación y fragmentación de las hojas, por ello es importante tener un promedio del porcentaje de humedad en el que tiene que estar el papel, según la literatura, el intervalo va de 3.7-5.5 %<sup>16</sup> y en la tablas 20, 21, 22 y 23 observamos que los resultados obtenidos están dentro del rango, las hojas obtenidas tienen la cantidad de agua necesaria para que no ocurran cambios en las propiedades físicas de las mismas, ya que si hubiera un exceso de agua, las fibras de las hoja se hincharían y se volverían más flexibles lo cual afectaría sus propiedades, las uniones entre las fibras y disminuiría su resistencia.

La densidad aparente es una de las propiedades fundamentales más importantes, ya que ésta nos proporciona información sobre la estructura de la hoja. Algunos valores normales de densidad aparente del papel en g/cm<sup>3</sup> van de 0.5 en papeles voluminosos hasta 0.75 para papeles con alto número de uniones (más comprimidos), como el bond. Algunos papeles como el couché y el glassine, tienen densidades de 1.0 g/cm<sup>3</sup> o mayores<sup>24</sup>. En la tabla 13 y 14, se muestra que las hojas que se obtuvieron a nivel laboratorio tienen una densidad aparente mayor a 0.8 g/cm<sup>3</sup>, sobrepasando incluso el valor de 1 g/cm<sup>3</sup>, mientras que en la tabla 15 y 16 las hojas que se obtuvieron a nivel planta piloto tienen una densidad aparente mayor a 0.6 g/cm<sup>3</sup>, por lo que las hojas se encuentran muy comprimidas, es decir, existe muy poco volumen entre las fibras de papel, esto significa que tienen un alto número de uniones.

El Bulk, o volumen específico es la recíproca de la densidad, y en la literatura se tienen valores de 2 cm<sup>3</sup>/g en papeles voluminosos hasta 1.33 cm<sup>3</sup>/g para papeles

con alto número de uniones, y para papeles como el couché y el grassine de 1 cm<sup>3</sup>/g, y en lo reportado experimentalmente, en las tablas 17 y 18 vemos que los valores de Bulk van de 0.8 cm<sup>3</sup>/g hasta valores superiores a 1 cm<sup>3</sup>/g, y en las tablas 19 y 20 observamos que es el mismo caso, los valores van de 0.9 cm<sup>3</sup>/g hasta valores mayores a 1 cm<sup>3</sup>/g, por lo que es congruente con los valores de la densidad aparente, ya que para hojas con un alto número de uniones tenemos un valor reportado en la literatura de 1.33 cm<sup>3</sup>/g, por lo que tenemos hojas muy voluminosas y comprimidas.

Para saber que tan resistente es una hoja de papel al agua, se utiliza el método tipo Hércules, en el cual se utiliza una solución acuosa con la que no se contaba en el laboratorio y con un equipo especial, por lo que se utilizó como solución agua destilada y un gotero. A cada hoja se le agregó una gota de agua, la cual fue absorbida en cuestión de segundos. Para las hojas obtenidas a nivel laboratorio (Ver tablas 25 y 26) observamos que el tiempo de absorción va de 9 s a un tiempo máximo de 51.5 s, y para las hojas que se obtuvieron a nivel planta piloto (Ver tablas 27 y 28) el tiempo va de 9 s a 18.5 s, con lo cual vemos que los tiempos de absorción varían mucho entre cada hoja, y son muy altos a comparación de otros papeles. No obstante, hay que recordar que las hojas obtenidas a partir de la hoja de chayote son muy gruesas y resistentes, lo cual hace que su resistencia a la absorción del agua sea alta.

El pH dentro de la industria papelera es de suma importancia, ya que la durabilidad de este se da en función de su acidez o alcalinidad, puesto que la vida de un papel alcalino se mide en cientos de años, y la vida de un papel ácido se mide en décadas<sup>4</sup>, por lo que la elaboración de las hojas de papel se realizó en un medio básico. En la literatura se reporta que el papel terminado ligeramente alcalino varía su pH de 7 a 9<sup>4</sup>, y en las tablas 33, 34, 35 y 36 observamos valores de pH de 8, los cuales están dentro del rango, lo cual nos indica que se obtuvieron hojas con una alta durabilidad.

Para la prueba de escritura se utilizó lápiz, bolígrafo, colores y marca textos para poder escribir y colorear en la hojas, y el resultado para cada hoja fue el mismo (Ver

tablas 29, 30, 31 y 32). Para escribir con bolígrafo y lápiz es difícil, aunque la tinta y el grafito no se corren, mientras que para colorear de igual manera resulta trabajoso, y tampoco se corre el color, y finalmente para sombrear una palabra con marca textos la sustancia de color permanece intacta, pero de igual manera es complicado. Estos problemas se deben a que las hojas no son uniformes, y tienen pliegues rugosos que hacen complicada más no imposible la escritura, a comparación de una hoja blanca común de impresión, en donde colorear y escribir resulta fácil gracias a su lisura.

## **CONCLUSIONES**

De acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos a partir de este trabajo experimental se obtuvo lo siguiente:

Sin duda, es posible obtener hojas de papel a partir de desechos naturales o de plantas consideradas desecho, tal es el caso de las hojas de chayote, las cuales tienen pocos usos, pero en este trabajo encontramos que tiene uno importante, el de utilizarlas para obtener pulpa celulósica y formar hojas de papel. Éstas tienen características similares a las hojas que comúnmente conocemos, en ellas se puede escribir y son resistentes, sin embargo, este proceso aun no es viable para las industrias, ya que esto requiere de diversas mejoras, y este trabajo no se enfoca en ello, sino en demostrar que las fibras No maderables son una alternativa para disminuir la tala inmoderada de árboles, lo cual es sin duda una problemática hoy en día. No obstante, es importante mencionar que la obtención de las hojas es sencilla, pero se debe mejorar el proceso de secado y prensado, ya que las hojas presentan arrugas y ondulaciones que no permiten una buena escritura y una hoja uniforme.

Las corridas que se hicieron para la obtención de las hojas de papel fueron de dos maneras, a nivel laboratorio y nivel planta piloto, esto para saber qué proceso nos daba un mayor rendimiento, y con dicha experimentación se llegó a la conclusión que las condiciones de operación más propicias para obtener una mejor digestión y

por ende una buena calidad de las hojas es a una concentración del 10% de NaOH, a una temperatura de 115 °C, un tiempo de 40 minutos y una presión de vapor de 1.2 kg/cm<sup>2</sup>, todo esto realizado en un digestor.

Las propiedades físicas de las hojas nos muestran que estas tienen arrugas y ondulaciones que hacen difícil el colorear y escribir, más no imposible, esto debido al prensado y secado de las hojas. Mientras que las propiedades químicas nos indican que es un papel alcalino, el cual será de gran durabilidad de acuerdo a la literatura.

Haciendo una comparación en ambos procesos, para que se lleve a cabo una buena digestión es necesario utilizar un digestor a presión, ya que esto optimiza el proceso en cuanto a tiempo y calidad de pulpa, ya que la presión ayuda a la buena separación de las fibras, y a nivel laboratorio el proceso se alarga por horas y es necesario aún hacer la desfibración mecánica para obtener una pasta más uniforme. Sin embargo la calidad de las hojas es similar, más no igual en todas las corridas, ya que las obtenidas a nivel planta piloto tienen menos arrugas y son un poco más resistentes en comparación con las obtenidas a nivel laboratorio, no obstante, de acuerdo con la literatura concluimos que son hojas de papel de calidad, que si bien tienen el criterio de uso como papel manual debido a sus características, ya que como se mencionó anteriormente el proceso necesita varias mejoras.

La investigación nos da un amplio panorama que nos muestra que plantas de poco interés como las hojas de chayote pueden ser utilizadas como materia prima en la elaboración del papel, y que para una buena digestión es necesario meter la variable de presión, sin embargo en ambos procesos (nivel laboratorio y nivel planta piloto) es necesario mejorar algunos puntos de control, lo que sin duda alguna servirá para que nuevas generaciones de ingenieros químicos creen un proceso mejorado y esto pueda escalar hacia la industria y genere un impacto positivo en el medio ambiente en que habitamos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Avendaño, C. H.; Cadena, I.J. **Las Variedades del Chayote Mexicano, Recurso Ancestral con Potencial de Comercialización.** Recuperado el 20 de noviembre del 2019 en:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231856/Las\\_variedades\\_del\\_chayote\\_mexicano.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231856/Las_variedades_del_chayote_mexicano.pdf)
2. Arévalo, G. L.; Cadena I. J. **Rescatando y Aprovechando los Recursos Fitogenéticos de Mesoamérica Volumen 3: Chayote: Manejo Postcosecha.** Recuperado el 8 de diciembre del 2019 en:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231852/El\\_chayote\\_volumen\\_3.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231852/El_chayote_volumen_3.pdf)
3. Arévalo, G. L.; Cadena, I.J. **CHAYOTE una hortaliza con atributos nutricionales.** Recuperado el 15 de enero del 2020 en:  
[https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/160809chayote\\_posc\\_lurdes\\_arevalo\\_x?e=8490508/37837355](https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/160809chayote_posc_lurdes_arevalo_x?e=8490508/37837355)
4. Azorín. **Nivel de pH de un papel.** Recuperado el 12 de Febrero del 2021 en:  
<http://blog.graficasazorin.es/nivel-de-ph-de-un-papel/>
5. Cadena, I. J.; Arévalo, G. L. **Aprovechando los recursos fitogenéticos de Mesoamérica Volumen 1: Chayote.** Recuperado el 15 de noviembre del 2019 en:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231857/El\\_chayote\\_volumen\\_1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231857/El_chayote_volumen_1.pdf)
6. Cortés, M. C. I. **Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del agave angustifolia Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal.** Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca I. P. N. México, 2009. Pág. 8
7. **Características del Chayote.** Recuperado el 15 de Noviembre del 2019 en:  
<https://www.biodiversidad.gob.mx/usos/alimentacion/chayote.html>
8. **Chayote.** Recuperado el 30 de noviembre del 2019 en:  
<https://www.ecured.cu/Chayote>
9. **Espesor, Densidad y Peso Base del Papel.** Recuperado el 16 de Enero del 2020 en: <http://tio14sena.blogspot.com/p/espesor-desidad-y-peso-base-del-papel.html>
10. Epson. **Papel, especificaciones del papel.** Recuperado el 12 de Febrero del 2021 en: [https://support.epson-europe.com/onlineguides/es/sprx420/ref\\_g/spec\\_4.htm](https://support.epson-europe.com/onlineguides/es/sprx420/ref_g/spec_4.htm)



11. **El poder de... El chayote.** Recuperado el 21 de diciembre del 2019 en: <https://elpoderdelconsumidor.org/2019/02/el-poder-de-el-chayote/>
12. **El chayote.** (2016). Recuperado el 12 de enero del 2020 en: <http://www.2000agro.com.mx/organicos/el-chayote/>
13. Frías, T.J.A.; Ramírez, P.G.; Herrero, P. C.; Campusano, A. Y. **Sechium edule (jacq) sw: potencia fitoterapéutica como agente antibacteriano.** Recuperado el 12 de enero del 2020 en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/medisur/msu-2016/msu166b.pdf>
14. González, V. L.; Hernández, U. J.P.; Güemes, V. N. **Chayotextle (Sechium Edule), posible ingrediente en la elaboración de los productos libres de gluten.** Recuperado el 8 de diciembre del 2019 en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icap/n5/r5.html>
15. **Investigación y desarrollo para la industria gráfica.** Recuperado el 12 de Febrero del 2021 en: <http://investigaciongrafica.blogspot.com/2008/05/espesor-densidad-y-bulk-del-papel.html>
16. **Instrucciones de Uso Guía acerca del papel.** (2013). Recuperado el 20 de Abril del 2021 en: [http://support.rioh.com/bb\\_v1oi/pub\\_e/oi/0001051/0001051806/VD13879XXA\\_03/D1387944\\_es.pdf](http://support.rioh.com/bb_v1oi/pub_e/oi/0001051/0001051806/VD13879XXA_03/D1387944_es.pdf)
17. Libby E. **Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo II: Papel,** Continental, México.
18. Nemesny, A. **Cultivo y poscosecha del chayote.** Recuperado el 12 de enero del 2020 en: [https://www.poscosecha.com/es/noticias/cultivo-y-poscosecha-de-chayote/\\_id:80212/#:~:text=Es%20una%20planta%20herb%C3%A1cea%20trapidadora,con%20diferentes%20aspectos%20y%20sabores.&text=En%20la%20industria%20de%20alimentos,%20jugos%20salsas%20y%20pastas](https://www.poscosecha.com/es/noticias/cultivo-y-poscosecha-de-chayote/_id:80212/#:~:text=Es%20una%20planta%20herb%C3%A1cea%20trapidadora,con%20diferentes%20aspectos%20y%20sabores.&text=En%20la%20industria%20de%20alimentos,%20jugos%20salsas%20y%20pastas)
19. Pérez, P.J.; Gardey, A. (2018). **Definición de gramaje.** Recuperado de: <https://definicion.de/gramaje/>
20. Paisajismo Urbano. **Taxonomía vegetal: La utilidad de la taxonomía de las plantas.** Recuperado el 26 de noviembre del 2019 en: <http://www.jardinesverticales.net/taxonomia-vegetal/>
21. Papelería- Técnica. **Gramaje del papel. ¿Qué es el gramaje del papel?** Recuperado el 12 de Febrero del 2021 en: <https://papeleria-tecnica.net/gramaje-del-papel/>
22. **Producción mecánica de pulpa.** Recuperado el 16 de Enero del 2020 en: <https://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/produccion-mecanica>

23. **Propiedades físicas del papel.** (2017). Recuperado el 16 de Enero del 2020 en: <https://catalogodepapeles.wordpress.com/2017/01/10/propiedades-fisicas-del-papel/>

24. R. Lira Saade. **La agricultura en Mesoamérica.** Recuperado el 15 de noviembre del 2019 en:  
[http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/prior/segalim/prodalim/pr odveg/cdrom/contenido/libro09/Cap2\\_4.htm](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/segalim/prodalim/pr odveg/cdrom/contenido/libro09/Cap2_4.htm)

25. Secretaria de economía. **Normas Mexicanas, México.** Recuperado el 17 de Enero del 2020 en:<http://www.economia-nmx.gob.mx>

26. Teschke, K. (1995). **Industria del papel y de la pasta de papel. Sectores basados en recursos biológicos.** Recuperado el 16 de Enero del 2020 en:  
<https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+72.+Industria+d el+papel+y+de+la+pasta+de+papel>

27. Viva el cole. (2018). **La Historia del papel.** Recuperado el 25 de Marzo del 2021 en: <https://www.vivaelcole.com/blog/historia-del-papel/>

## **ANEXO 1**

### **Normatividad utilizada**

#### **NMX-N-009-SCFI-2005 INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL – ESPESOR Y PESO ESPECÍFICO DE PAPELES Y CARTONCILLOS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-N-009-1988)**

La siguiente norma nos muestra un procedimiento para poder determinar el espesor en papeles y cartoncillos con calibradores manuales y de lectura analógica.

El espécimen de prueba debe tener más de 10 hojas de por lo menos 40 mm x 120 mm que no tengan pliegues ni dobleces, y si por algún motivo los especímenes no cumplen con los antes mencionado se debe anotar en el reporte.

Para los resultados el espesor debe ser reportado en fracciones de mm (micrómetros), y con ello las lecturas máxima y mínima y el número y tamaño de las hojas de prueba.

#### **NMX-N-001-SCFI-2011. INDUSTRIAS DE CELULOSA Y PAPEL - DETERMINACIÓN DEL GRAMAJE O PESO BASE DEL PAPEL, CARTONCILLO Y CARTÓN (PESO POR UNIDAD DE ÁREA) - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-N-001-SCFI-2005)**

Esta norma establece un procedimiento a seguir para poder determinar el peso base del papel, cartoncillo y cartón, utilizando una balanza, la cual debe ser legible y con una sensibilidad del 0.25% de la carga aplicada. Esta debe estar aislada de vibraciones y de corrientes de aire.

Para el pesado también se cuenta con balanzas desarrolladas específicamente para la determinación del peso base, y dependiendo del tipo de papel se especifica el área del mismo a pesar, y se obtiene de manera directa su peso en  $\frac{g}{cm^2}$ . Cabe mencionar que en dichas balanzas el área del papel no debe ser menor a 500 cm<sup>2</sup>,

no obstante para muestras con áreas más pequeñas se debe utilizar una balanza analítica con una sensibilidad de 0.1 mg.

Para poder obtener el área y el peso base de la muestra se deben medir las dimensiones de las hojas, las cuales no deben tener una desviación mayor a 0.2%, y se procede a calcular el área, la cual debe tener una exactitud de 0.3%. Si se utiliza una balanza específica se debe asegurar que las medidas de las hojas tengan una exactitud de 0.2%.

Con el peso que se obtuvo y el área de la muestra se calcula el peso base en  $\frac{g}{cm^2}$  con la siguiente ecuación:

$$Pb = \frac{P}{A}$$

Donde:

Pb= Peso base o gramaje de la muestra de papel [ $\frac{g}{cm^2}$ ]

P= Peso de la hoja de papel [g]

A= Área de la hoja de papel [ $cm^2$ ]

Agregando el factor de conversión de  $cm^2$  a  $m^2$  ( $10000 cm^2 = 1m^2$ ) se tiene la siguiente ecuación:

$$Pb = \frac{P * 10000}{A}$$

Donde:

Pb= Peso base o gramaje de la muestra de papel [ $\frac{g}{m^2}$ ]

P= Peso de la hoja de papel [g]

A= Área de la hoja de papel [ $cm^2$ ]

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

El método para determinar la humedad de papeles y cartones descrito en esta norma es por secado de estufa, en donde el procedimiento consiste en pesar un recipiente vacío con su tapa, para así posteriormente colocar la muestra dentro del mismo y pesarlo con su tapa, obteniendo así el peso de la muestra con humedad (G). Se coloca la muestra en una malla metálica y se introduce en la estufa, la cual debe estar a una temperatura de  $105 \pm 2$  °C.

Para los tiempos de secado se divide en especímenes grandes (50 g) y especímenes pequeños (2 g), en donde:

- Especímenes grandes (50 g). Para muestras de papel con gramaje inferior a los  $224 \text{ g/m}^2$  el tiempo de secado en la estufa debe ser de 1 hora; para gramajes superiores, secar 2 horas.
- Especímenes pequeños (2 g). Para muestras de papel con gramaje inferior a los  $224 \text{ g/m}^2$  el tiempo de secado en la estufa debe ser de 30 min; para gramajes superiores, secar 1 hora.

Una vez transcurrido el tiempo de secado se saca la muestra y se deja enfriar dentro del desecador y se pesa el recipiente con su contenido, posteriormente se coloca nuevamente la muestra dentro de la estufa por un tiempo igual al inicial del secado, y así repitiendo el procedimiento hasta obtener peso constante de la muestra seca (GS) Se considera peso constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas no es mayor de 0.1 % respecto a la penúltima.

La humedad debe ser reportada en % con una aproximación de 0.05%, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{G - G_s}{G} * 100$$

Donde:

H = Humedad referida al peso inicial del papel [%]

G = Peso inicial de la muestra en [g]

Gs = Peso final de la muestra en [g]

**PROY-NMX-N-005-SCFI-2017. CELULOSA Y PAPEL – DETERMINACIÓN DEL ENCOLADO DEL PAPEL POR SU RESISTENCIA A LA TINTA (MÉTODO TIPO HÉRCULES) – MÉTODO DE PRUEBA. (CANCELARÁ A LA NMX-N-005-SCFI-2006)**

Esta norma nos muestra el método tipo Hércules para la determinación del encolado del papel, la cual es la resistencia que el papel opone a la penetración de los líquidos acuosos. Es importante mencionar que este método es especialmente apropiado para que se use como prueba de control del encolado en las plantas, para así detectar los cambios en el grado de encolado del papel, y es utilizado también para optimizar los costos en el consumo de encolantes.

Los equipos que se utilizan para este método son un fotómetro que cumpla con los siguientes requisitos: Que ilumine la superficie inferior del espécimen del papel a 45°, por medio de dos lámparas incandescentes de halógeno alimentadas por una fuentes de voltaje constante, equidistantes y separadas 180° con respecto al centro del espécimen, Una fotocelda de silicio (medida) con visión a 90° del espécimen y una segunda fotocelda de silicio (referencia) con visión directa de los filamentos de la lámpara; medios para balancear las dos señales de salida de las fotoceldas y medios para aplicar el porcentaje deseado a la salida de la fotocelda de referencia, un cronómetro integrado, estándares estables de trabajo como placas de cerámica, un soporte para colocar el espécimen, un disco o un bloque negro para cubrir al mismo, y un dosificador adecuado para la tinta.

Para iniciar con el método primeramente se enciende el instrumento, y esperamos 15 minutos para su calentamiento, posteriormente se coloca el espécimen de papel

en el soporte y este se coloca sobre el instrumento y se pone el bloque o disco negro sobre el espécimen, se calibra y se quita la cubierta del soporte para verter 10 mL de tinta sobre el mismo y se arranca el cronómetro y cuando el % de reflectancia alcanza el punto de referencia, termina la prueba.

### **NMX-N-011-1965 METODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PH EN PAPEL.**

La siguiente norma nos muestra un método para la determinación del pH en el extracto acuoso, no filtrado, del papel. Existen dos procedimientos: Extracto en frío y extracto en caliente, en donde el primero consiste en colocar la muestra en un vaso de 100 mL se agrega agua destilada y se macera con un agitador, se cubre con un vidrio de reloj y se deja reposar 1 h, y pasado el tiempo se determina el pH con el electrodo de vidrio. Por otro lado, para el extracto en caliente, la muestra se introduce en un matraz, se agrega agua destilada y se macera con una varilla agitadora, posteriormente se coloca en el matraz un tubo de vidrio que servirá como condensador, se calienta durante 1 h y se deja enfriar. Por último se mide el pH de la solución no filtrada con el electrodo de vidrio.

## ANEXO 2

### Memoria de cálculo.

#### Digestión

Para cada corrida fue necesario hacer una disolución de NaOH tanto al 10% como al 15%, por lo que se ocupó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ masa} = \frac{\text{masa del soluto (g)}}{\text{ml de la solución}} * 100 \dots (1)$$

- Nivel laboratorio

$$10\% \text{ NaOH} = \frac{\text{masa de soluto (g)}}{5000 \text{ mL}} * 100$$

Resolviendo con SOLVE en la calculadora obtenemos:

$$\underline{\text{Masa de soluto} = 500 \text{ g de NaOH}}$$

$$15\% \text{ NaOH} = \frac{\text{masa de soluto (g)}}{5000 \text{ mL}} * 100$$

$$\underline{\text{Masa de soluto} = 750 \text{ g de NaOH}}$$

-Nivel planta piloto

$$10\% \text{ NaOH} = \frac{\text{masa de soluto (g)}}{13000 \text{ mL}} * 100$$

Resolviendo con SOLVE en la calculadora obtenemos:

$$\underline{\text{Masa de soluto} = 1300 \text{ g de NaOH}}$$

$$15\% \text{ NaOH} = \frac{\text{masa de soluto (g)}}{1000 \text{ mL}} * 100$$

$$\underline{\text{Masa de soluto} = 1500 \text{ g de NaOH}}$$



### **Peso base**

Para la determinación del gramaje de las hojas se utilizó la siguiente ecuación:

$$Pb = \frac{P}{A} \dots (2)$$

Donde:

Pb= Peso base o gramaje de la muestra de papel ( $\frac{g}{cm^2}$ )

P= Peso de la hoja de papel (g)

A= Área de la hoja de papel ( $cm^2$ )

Sustituyendo datos para la determinación del peso base para la hoja 1 al 10% a nivel laboratorio se obtuvo el siguiente resultado:

$$Pb = \frac{1.4305g}{25 cm^2} = 0.05722 \frac{g}{cm^2} = 572.2 \frac{g}{m^2}$$

### **Densidad aparente**

Utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho A = \frac{Pb}{Espesor} = \frac{1}{BK} \dots (3)$$

Donde:

$\rho A$ = Densidad aparente ( $\frac{g}{cm^3}$ )

Pb= Peso base ( $\frac{g}{m^2}$ )

Espesor = Espesor promedio de la hoja de papel ( $\mu m$ )

Bk= Bulk ( $\frac{cm^3}{g}$ )

Realizando el cálculo para la hoja 1 al 10% a nivel laboratorio:

$$\rho A = \frac{0.05722 \left(\frac{g}{cm^2}\right)}{0.092 \text{ cm}} = 0.621956522 \frac{g}{cm^3}$$

## Bulk

Para calcular el volumen específico aparente se utilizó la siguiente ecuación:

$$BK = \frac{\text{Espesor}}{Pb} = \frac{1}{\rho A} \dots (4)$$

Donde:

$$BK = \text{Bulk} \left(\frac{cm^3}{g}\right)$$

$$Pb = \text{Peso base} \left(\frac{g}{cm^2}\right)$$

$$\text{Espesor} = (\mu m)$$

$$\rho A = \text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{cm^3}\right)$$

Realizando cálculos para la hoja 1 al 10% a nivel laboratorio:

$$BK = \frac{1}{0.621956522 \frac{g}{cm^3}} = 1.60782943 \frac{cm^3}{g}$$

## Contenido de humedad

Para obtener el contenido de humedad se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = \frac{G - G_s}{G} * 100$$

Donde:

H = Humedad referida al peso inicial del papel [%]

G = Peso inicial de la muestra en [g]

G<sub>s</sub> = Peso final de la muestra en [g]

Haciendo el cálculo para la hoja 1 al 10% a nivel laboratorio:

$$\frac{0.520g - 0.500g}{0.520g} * 100 = 3.84\%$$