

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El papel está por todas partes. Tiene un sinnúmero de aplicaciones que es usado continuamente en la vida diaria. Y todo ello sin ser verdaderamente conscientes del negativo impacto medioambiental que tiene. Empezando por la tala de árboles, pasando por su fabricación y hasta su consumo, que muchas veces llega a ser desmedido, por tal motivo nace la necesidad de encontrar otras materias primas fibrosas no maderables.

El nombre del papel se deriva de la planta llamada papiro (*Cyperus papyrus*). Los antiguos egipcios produjeron el primer material de escritura del mundo uniendo entre sí finas láminas del tallo de esta planta (Smook, 1990).

La invención del papel se debe a los chinos. Cuenta la leyenda que hacia el año 105, un hombre llamado Ts'ai Lun observó que de los paños de seda que lavaba su mujer se desprendían unas fibras que con el agua formaban una pasta. Esta pasta, parecida a un fieltro, una vez puesta a secar, daba una lámina consistente (Enciclopedia Temática Oceano Color, 1996).

La principal fuente de fibra para la fabricación de pasta y de papel es la madera de coníferas y de especies arbóreas de hoja caduca. Fuentes secundarias son la paja de trigo, el centeno y el arroz; cañas, como el bagazo; los tallos leñosos del bambú, lino y cáñamo, y fibras de semillas, hojas y cortezas, como las del algodón, el abacá y el henequén o sisal (Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, 1998).

De acuerdo a (Sanz Tejedor, 2014), más del 90% de la producción de celulosa se obtiene de la madera y el 10% restante de otras plantas.

A escala global, las fibras no maderables son una parte minoritaria del suministro de materia prima para la manufactura de papel y cartón. Según estadísticas provenientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2020), para el año 2019 se produjeron 6'134.000 toneladas de pulpa a partir de fibras no maderables, las fibras no maderables mayormente usadas son paja, bagazo, bambú,

sisal, yute, cáñamo, abacá, kenaf, etc. A continuación, se presenta a los mayores productores a nivel mundial.

Tabla 1: Producción de pulpa a partir de fibras no maderables (2019)

País	Toneladas de pulpa
China	5'877.000
Argentina	130.000
Tailandia	118.000
Japón	5.000
República Checa	4.000
TOTAL	6'134.000

Fuente: Elaboración propia con datos de (FAO, 2020)

Como se puede observar en la tabla con una producción de 5'877.000 toneladas de pulpa China es el país que produce mayor cantidad de pulpa de celulosa a partir de fibras no maderables, en segundo lugar, se encuentra Argentina con una producción de 130.000 toneladas de pulpa y en tercer lugar esta Tailandia con una producción de 118.000 toneladas de pulpa.

En Bolivia los departamentos de Cochabamba, La Paz, Beni y Santa Cruz son los productores de plátano, concentrándose la mayor parte de la producción en el trópico boliviano (Cochabamba), habiendo tenido una producción de 249.081 toneladas en año 2021, desde tiempo pasado este cultivo ha sido una fuente de ingresos económicos para muchas familias dedicadas a la agricultura.

Según (Saravia Otalora, 2017), la industria platanera produce una gran cantidad de residuos vegetales, ya que de la planta solamente se aprovecha el fruto, teniendo que disponer de las demás partes de la planta: pseudotallo, hojas y pinzote. Reportando que al finalizar la colecta de la fruta, la planta de plátano puede generar 8 TM/ha de pseudotallo, 4,7 TM/ha de hojas y 0,7 TM/ha de pinzote.

La composición química de los residuos del cultivo de plátano, contienen lignina en un 9-10 %, que es un biopolímero aromático amorfo difícil de biodegradar, junto con un

61,1 % de celulosa que constituyen los productos principales de este residuo, lo convierte en una opción favorable para la producción de papel. La utilización de fibra de plátano como materia prima alternativa en la elaboración de papel, resulta en las condiciones actuales una alternativa no solo viable y sostenible, sino que también, es una solución a la conservación de la biodiversidad biológica y al suministro de alimentos para la población mundial (Mazzeo , León, Mejía , Guerrero, & Botero, 2010).

Según estudios realizados por (Shedden, 1978) el pinzote de plátano está constituido por 93 % de agua, 7 % de materia sólida, de la cual el 40 % es fibra y un contenido de lignina de 11,7 % y de celulosa un 53 %, además demostró que existe factibilidad técnica para producir papel a partir del pinzote.

El raquis o pinzote de plátano ha sido objeto de estudio, para su aprovechamiento, por otros países productores de plátano, como Costa Rica, Colombia, Ecuador y Brasil. Dichos países han implementado pequeñas industrias para la obtención de celulosa, para elaborar cartón, papel, y artesanías como ser: tarjetas, libretas, cajas, etc. En Bolivia se planea tener una industria que produzca celulosa vegetal de los desechos agroindustriales, tales como el pinzote del plátano (Saravia Otalora, 2017).

En 1978, a través de la ex CODETAR, se suscribió el contrato para la instalación de una fábrica de Papel en la comunidad de Sidras, Cantón Emborozú, Primera Sección de la provincia Arce a 105 km de Tarija y se conformó una Sociedad Anónima denominada IPTASA (Industria Papelera Tarija Sociedad Anónima) con capitales chinos, CODETAR e inversores privados para su funcionamiento. Posteriormente seis años después el 14 de abril de 1986, mediante Decreto Supremo N° 21227 la Industria Papelera de Tarija – IPTASA de propiedad de la Corporación de Desarrollo de Tarija CODETAR, mediante un crédito argentino adquirió materia prima, equipos, insumos y repuestos para la fábrica de papel. Debido a la falta de materia prima, problemas técnicos en la producción y la disposición final de aguas residuales fundamentalmente, fue cerrada (La construcción de Padcaya, 2016).

La Empresa Pública Nacional Estratégica Papeles de Bolivia (PAPELBOL) fue creada mediante DS N° 29255 de 5 de septiembre de 2007 con una capacidad de 15.200 toneladas año, que empezó produciendo 80 toneladas en su primer año (2014). En 2015 dio un giro a la producción ecológica. PAPELBOL tuvo como material base los residuos ya utilizados. Para producir una tonelada de pasta de celulosa virgen se talan entre 16 y 20 árboles para la producción de una tonelada de papel blanco. Con la recolección de papel en desuso no se alienta la tala de árboles, para obtener la celulosa y se evita que el papel se convierta en una de las fuentes de contaminación, en su proceso de destrucción, actualmente PAPELBOL produce 600 toneladas de papel en un mes (Tancara, 2019).

Actualmente en el país existen empresas que están tomando conciencia en el tema medioambiental, por lo que están empleando fibras no maderables para la elaboración del papel, entre ellas se encuentra Bohemia Papel que es una microempresa 100 % amigable con el medio ambiente, transforma el papel reciclable y la fibra vegetal en hojas de manera artesanal con la ayuda de un bastidor y hoy se destaca con diferentes productos que llaman la atención en el exterior.

Objetivos

Objetivo General

Obtener pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir del pinzote de plátano (*Musa balbisiana*) cultivado en el trópico boliviano.

Objetivos Específicos

- ✚ Caracterizar la materia prima: pinzote de plátano (*Musa balbisiana*) cultivado en el trópico boliviano.
- ✚ Seleccionar el proceso tecnológico para la obtención de pulpa de celulosa.
- ✚ Formular y ejecutar la fase experimental del proceso tecnológico de obtención de pulpa de celulosa.
- ✚ Realizar el balance de materia y energía en el proceso tecnológico de obtención de pulpa de celulosa.

- ✚ Determinar el rendimiento del proceso experimental de obtención de pulpa de celulosa.
- ✚ Caracterizar la pulpa de celulosa.
- ✚ Realizar el estudio de costos del proyecto.

Justificación

Justificación tecnológica

El presente estudio de investigación tiene el propósito de aprovechar uno de los residuos agrícolas del cultivo de plátano, específicamente el pinzote, una materia prima disponible, de fácil obtención, de fácil procesamiento con tecnología existente. Debido a que el pinzote está constituido por fibras lignocelulósicas, es posible utilizarlo como materia prima para la obtención de celulosa con la que se puede fabricar papel.

Justificación económica

El país importa grandes cantidades de pulpa y papel, para la producción de papel y productos de papel de países como ser Brasil, Argentina, China, Perú entre otros, generando altos costos por concepto de importación.

A continuación, se presenta la tabla de importación de pulpa y papel en Bolivia realizada en los últimos 5 años:

Tabla 2: Importaciones nacionales de pulpa y papel (2017 – 2021)

Año	2017	2018	2019	2020	2021
Toneladas	179.270,7	183.847,3	180.660,8	166.161,9	164.442,2
Millones de dólares	218,2	236,4	225,8	182,3	192,3

Fuente: INE 2022

Esta investigación es importante porque pretende contribuir al desarrollo sostenible, utilizando un recurso completamente renovable, transformándolo en un producto de valor agregado, que permitirá generar ingresos adicionales a los productores de plátano en el trópico boliviano. Permitiendo a las empresas productoras de papel disminuir las importaciones de pulpa y papel.

Justificación social

El proyecto contribuirá a la sociedad mejorando la calidad de vida de aquellas personas involucradas en la producción de plátano, dándoles un ingreso extra e incentivando al crecimiento de este sector, además de generar fuentes de empleo, que a su vez generará mayor movimiento económico en el país.

Justificación ambiental

La utilización de fibras no maderables para la producción de papel, contribuiría a la disminución de residuos que se generan en la actividad agrícola, los cuales por lo general son mínimamente aprovechados, en otros casos son depositados en el suelo causando problemas ambientales, también contribuye en plantear una opción alternativa a la deforestación de bosques y contribuir con ello a la recuperación del equilibrio medio ambiental.

Justificación personal

En el presente proyecto se pretende aplicar todos los conocimientos adquiridos durante la formación académica, para optar el título profesional de licenciatura en ingeniería química, llevando a cabo un estudio de investigación aplicada sobre la obtención de pulpa de celulosa para producir papel, contribuyendo a la sociedad con los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. El plátano

El plátano rosado (*Musa balbisiana*), también denominado plátano macho, es una planta herbácea de la familia de las musáceas, que crece hasta seis metros de altura, de tronco fuerte, cilíndrico, succulento, que sale de un tallo bulboso pulposo y grande. Es uno de los progenitores de la banana o plátano comercial, *Musa paradisiaca*. Hoy la inmensa mayoría de los ejemplares plantados para obtener fruto proceden de alguna variedad cultivar obtenida por hibridación de *M. acuminata* y *M. balbisiana*, pero esta última se cultiva aún.

Constituye la base de alimentación de muchos países tropicales, y es una de las frutas más consumidas en todo el mundo, dada su versatilidad y adaptación para diferentes preparaciones (Díaz, 2011).

1.2. Origen y distribución geográfica del plátano

Las bananas y los plátanos son nativos del sudeste de Asia, donde han sido cultivados desde hace miles de años. Se piensa que las bananas fueron introducidas en África en tiempos prehistóricos. Evidencias recientes sugieren que las bananas fueron introducidas en el Nuevo Mundo (Ecuador) por inmigrantes provenientes del sudeste asiático alrededor del año 200 a. C.; más recientemente, a principios del siglo XVI, ellas fueron reintroducidas por los exploradores portugueses y españoles. Los portugueses introdujeron las bananas en las Islas Canarias, mientras que los españoles lo hicieron en La Española (Crane & Balerdi, 2019).

1.3. Taxonomía del plátano

Tabla I-1: Taxonomía del plátano

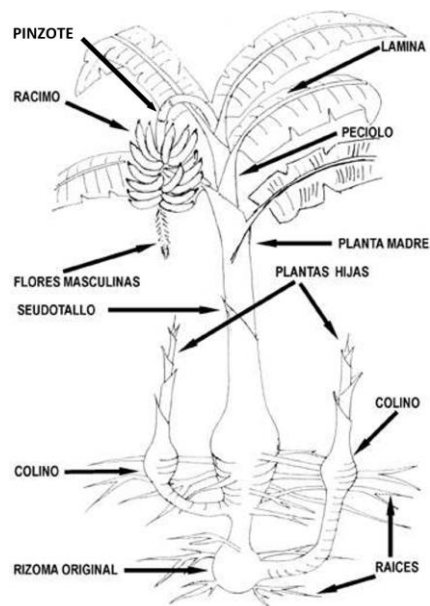
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Musaceae
Género	Musa
Especie	Musa balbisiana

Fuente: (Naturalista, 2020)

1.4. Morfología del plátano

1.4.1. La planta

Figura I-1: Esquema de una planta de plátano



Fuente: (InfoAgro, 2009)

La planta de plátano consiste de uno o más falsos tallos (las partes erectas que se asemejan a troncos), un rizoma subterráneo y un sistema de raíces fibrosas. El falso

tallo constituye el tronco funcional que sostiene a las hojas, flores y frutos (Crane & Balerdi, 2019).

1.4.2. Seudotallo

También llamado falso tallo, es la parte aérea de la planta, formado por las vainas envolventes de las hojas. El verdadero tallo aéreo que se eleva del cormo, está rodeado por numerosas hojas (Leon, 1968).

1.4.3. El rizoma

El rizoma es un tallo subterráneo con numerosos puntos de crecimiento (meristemos) a partir de los cuales surgen los falsos tallos, las raíces y los tallitos donde surgirán las flores y frutos (Crane & Balerdi, 2019).

1.4.4. Las hojas

Las hojas del plátano están formadas por una estructura tubular llamada vaina, un peciolo grueso y un limbo o lámina. Un grupo de numerosas vainas se disponen concéntricamente y de forma muy apretada para formar los falsos tallos, los cuales pueden poseer hasta 40 vainas durante su vida (Crane & Balerdi, 2019).

1.4.5. Las raíces

Un gran número (200 - 500) de raíces fibrosas salen del rizoma. En los suelos fértiles, bien drenados y profundos las raíces se pueden extender 5 pies (1,5 m) en profundidad y hasta 16 pies (4,9 m) lateralmente. (Crane & Balerdi, 2019).

1.4.6. Hijo

El hijo es un brote lateral que se desarrolla desde el rizoma, y generalmente surge muy cerca de la planta progenitora, también llamada planta madre. En español, se lo conoce como retoño, vástago, brote o colino (ProMusa, 2020).

1.4.7. Las flores

Flores amarillentas, irregulares y con seis estambres, de los cuales uno es estéril, reducido a estaminodio petaloideo. El gineceo tiene tres pistilos, con ovario ínfero. El

conjunto de la inflorescencia constituye el “régimen” de la platanera. Cada grupo de flores reunidas en cada bráctea forma una reunión de frutos llamada “mano”, que contiene de 3 a 20 frutos. Un régimen no puede llevar más de 4 manos, excepto en las variedades muy fructíferas, que pueden contar con 12 - 14 (Crane & Balerdi, 2019).

1.4.8. El Fruto

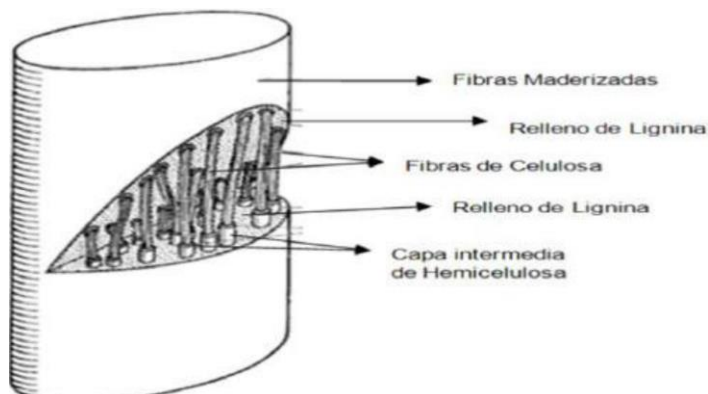
En una baya partenocarpia cuyo desarrollo está condicionado únicamente por la acumulación de pulpa en la cavidad formada por las paredes internas del pericarpio. En un comienzo el ovario crece en longitud y diámetro. Durante la primera semana es lento, pero va incrementándose significativamente a partir de la tercera semana. En toda variedad, el número de manos es fijo, y solo se altera por irregularidades hídricas o en la nutrición (InfoAgro, 2009).

1.4.9. Pinzote

El pinzote de plátano es la fracción de la planta, que soporta el conjunto de plátanos teniendo un peso por racimo de 45 a 50 kg, un peso por pinzote de 1 kg a 1,5 kg con medidas de largo 0,9 m a 1,5 m dependiendo la variedad y que además está constituido por fibras lignocelulósicas, de características semileñosa. El pinzote se considera residuo agroindustrial en los países productores de plátano, material que representa el 2,8 % del racimo en la variedad de *Musa balbisiana* y el 4,4 % en la de *Musa acuminata* (Turrado, Saucedo, Sanjuán, & Sulbaran, 2009).

A continuación, en La siguiente figura I-2 se describe la figura del pinzote de plátano y sus partes químicas que contiene, como fibras maderizas, relleno de lignina, fibras de celulosa, y capa intermedia de la hemicelulosa.

Figura I-2: Fragmentos del pinzote de plátano



Fuente: Tratado de química orgánica, 1998, p. 478.

(Turrado et al., 2009), obtuvo resultados sobre las características físicas y químicas de dos variedades de banano entre el pinzote de *Musa balbisiana* y *Musa acuminata*, señaladas en la siguiente tabla:

Tabla I-2: Características morfológicas y químicas de *Musa balbisiana* y *Musa acuminata*

Parámetro	Pinzote	
	<i>Musa balbisiana</i>	<i>Musa acuminata</i>
Longitud (m)	0,70	1,25
Humedad (%)	92,32	93,73
Peso Húmedo (kg)	1,262	2,434
Lignina (%)	13,09	12,87
α -celulosa (%)	38,13	40,21
Holocelulosa (%)	74,87	75,27

Fuente: (Turrado et al., 2009)

1.5. Lignocelulosa

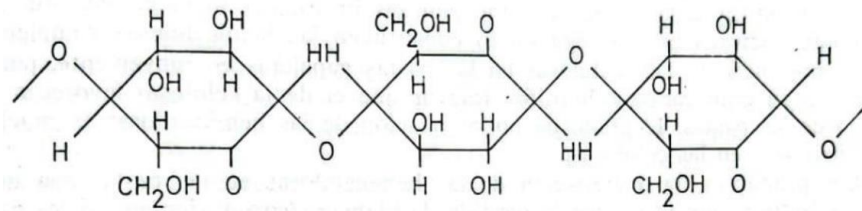
La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía. La lignocelulosa

(celulosa, hemicelulosa y lignina) es el principal y más abundante componente de la biomasa producida por la fotosíntesis, anualmente se forman 200.000 millones de toneladas en el mundo. La pared celular de las plantas está formada por lignocelulosa, la composición y porcentajes de los polímeros varían entre las especies de plantas (Cuervo, Folch, & Quiroz, 2001).

1.6. Celulosa

Es un hidrato de carbono de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, es decir, un polímero en el que el valor de n es variable de unos tipos a otros. Está comprobado que todas las moléculas de celulosa no contienen cadenas de la misma longitud, sino que las celulosas naturales de diferentes orígenes tienen moléculas de distinta longitud. Se supone que se trata de una larga cadena de moléculas de celobiosa, con la siguiente fórmula esquemática (Rodríguez Jiménez, 1970):

Figura I-3: Estructura de la celulosa



Fuente: (Rodríguez Jiménez, 1970)

1.6.1. Clasificación de la celulosa

- ✚ **Alfa celulosa:** Es la porción que permanece sin disolver al someter la materia prima en una solución diluida de hidróxido de sodio, que es filtrada, lavada, secada y pesada. La determinación de este compuesto proporciona la calidad en la estructura del papel, e indica la cantidad de celulosa verdadera presente en la pulpa (Rodríguez Jiménez, 1970).
- ✚ **Beta celulosa:** Es la sustancia que se precipita al acidular el filtrado que queda después de hacer la determinación de alfa celulosa (Rodríguez Jiménez, 1970).

- ✚ **Gamma celulosa:** Es la sustancia que queda disuelta en el filtrado sobrante de la determinación de beta celulosa (Rodríguez Jiménez, 1970).

1.7. Hemicelulosa

La hemicelulosa es aquella estructura que envuelve y resguarda a la celulosa. Es un (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado, en este caso un tanto especial, por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4) (fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico), que forman una cadena lineal ramificada. Entre estos monosacáridos destacan más: la glucosa, la galactosa o la fructosa. Forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina (QUIMICA.ES, 2021).

1.8. Holocelulosa

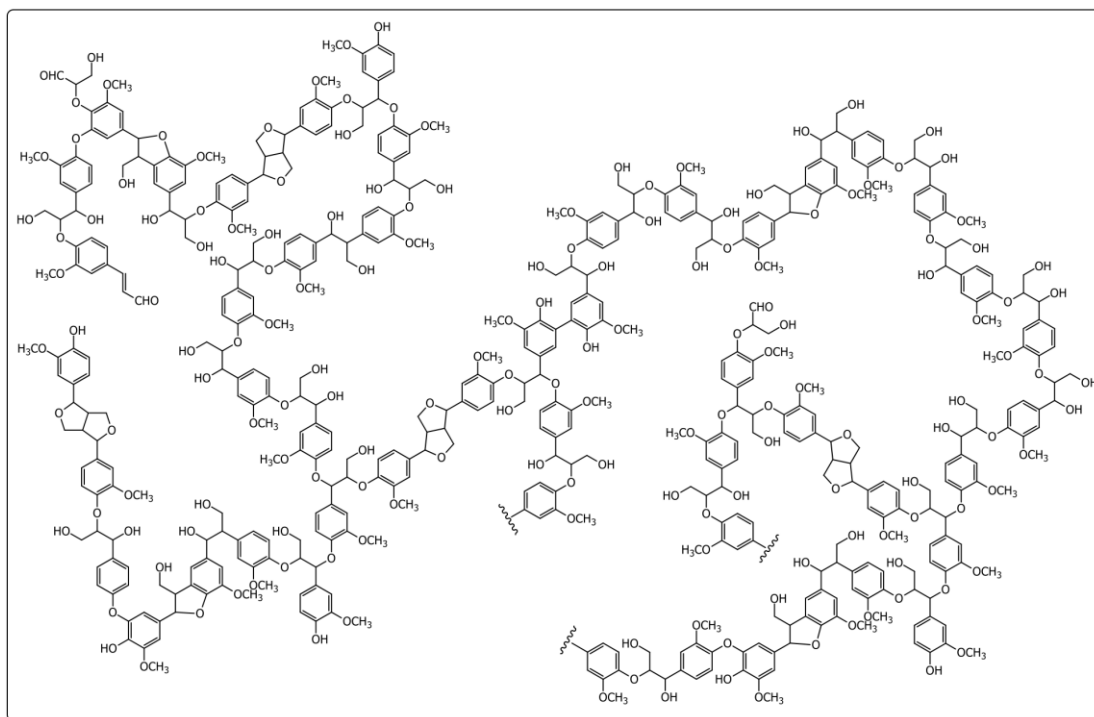
Es difícil establecer una barrera que separe celulosas de hemicelulosas, pues no se trata de unos productos definidos en cuanto a su grado de polimerización, Existe una fracción de auténtica celulosa (la α -celulosa), otra algo más débil (β -celulosa) y, por último, otra fácilmente atacable (γ -celulosa). Pero la separación entre ambas no es tajante. Por eso, un término muy frecuente es el concepto de holocelulosa, entendiéndose por tal el conjunto de todas las celulosas y hemicelulosas contenidas en una pasta (Rodríguez Jiménez, 1970).

1.9. Lignina

La lignina es un polímero natural heterogéneo, de carácter aromático, constituyente de las plantas, a las cuales da dureza y resistencia, es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que la lignina es la única fibra no polisacárido que se conoce. Realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas, como el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos,

compresiones y flexiones (Gutiérrez, Guirola, Martínez, Albernas, & Villanueva, 2020).

Figura I-4: Estructura de la lignina



Fuente: (Chávez & Domine , 2013)

La molécula de lignina presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característica de la lignina.

La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad. Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan su estructura.

1.10. Pulpa y papel

La pulpa de celulosa es el material fibroso para la fabricación de papel. Las fibras de pulpa son normalmente de origen vegetal, pero para algunas aplicaciones especiales se usan también fibras animales, minerales, o sintéticas. Las pulpas utilizadas para su conversión química en otros productos se denominan pulpas para disolver (Smook, 1990).

El papel se ha definido tradicionalmente como "una hoja afieltrada constituida por fibras, fundamentalmente de naturaleza celulósica, formada sobre un tamiz fino a partir de una suspensión acuosa". En la práctica la mayor parte de los productos papeleros se fabrican también con aditivos no fibrosos (Smook, 1990).

1.10.1. Proceso de obtención de pulpa de celulosa

La pulpa de celulosa se obtiene por la separación de las fibras de madera u otros materiales fibrosos; es un producto intermedio en la manufactura del papel y cartón. La industria del papel tiene como propósito separar la celulosa de cualquier otro componente del cual este constituido un material vegetal, en especial la lignina. Por lo tanto, para el productor de pulpa, la lignina es el ingrediente indeseable que se debe eliminar durante la producción de pulpa. Las propiedades de los productos terminales dependerán de las propiedades de las pulpas utilizadas en su manufactura. Estas variaran a su vez con las especies de fibras de distintas maderas o de plantas no leñosas utilizadas, así como el proceso empleado en la obtención, de pulpa (Casey, 1990).

La producción de pulpa se logra por medios químicos o mecánicos, o mediante combinación de los dos procesos, los cuales se describen a continuación.

1.10.1.1. Procesos mecánicos

Biermann (1996) señala que "el pulpeo mecánico involucra el uso de una fuerza mecánica para pulpear los materiales lignocelulósicos, no se utilizan químicos, sólo el agua y el vapor; como fuente de fibras las correspondientes a maderas suaves de colores claros y no resinosas y algunas maderas duras. La lignina es retenida en la pulpa, por lo que, se obtienen altos rendimientos entre el 90 % y el 98 %. Estas pulpas se

caracterizan por su elevado volumen, alta rigidez, y bajo costo; además de que presentan una baja resistencia mecánica, dado que la lignina interfiere con los enlaces de hidrógeno entre las fibras cuando se hace el papel. La lignina también causa que la pulpa tienda a cambiar a color amarillo al ser expuesta al aire y a la luz” (Solano Hernandez, 2010).

1.10.1.3. Procesos semiquímicos

Los procesos mecánicos como los procesos químicos pueden usarse juntos, sin embargo, uno de ellos se convertirá en complementario del otro según la eficiencia que otorguen en el proceso (Casey, 1990).

1.10.1.2. Procesos químicos

En el pulpeo químico, la lignina se solubiliza mediante reacciones químicas a temperaturas elevadas, aproximadamente de 130 °C a 180 °C. El rendimiento total varía del 45 % al 55 %, dependiendo de la materia prima utilizada y del proceso de pulpeo aplicado. Estas pulpas presentan alta resistencia mecánica y contienen aproximadamente del 3 % al 5 % de lignina (Solano Hernandez, 2010).

Estos son los de mayor utilización en la industria papelera por su costo debido a la menor necesidad de maquinaria.

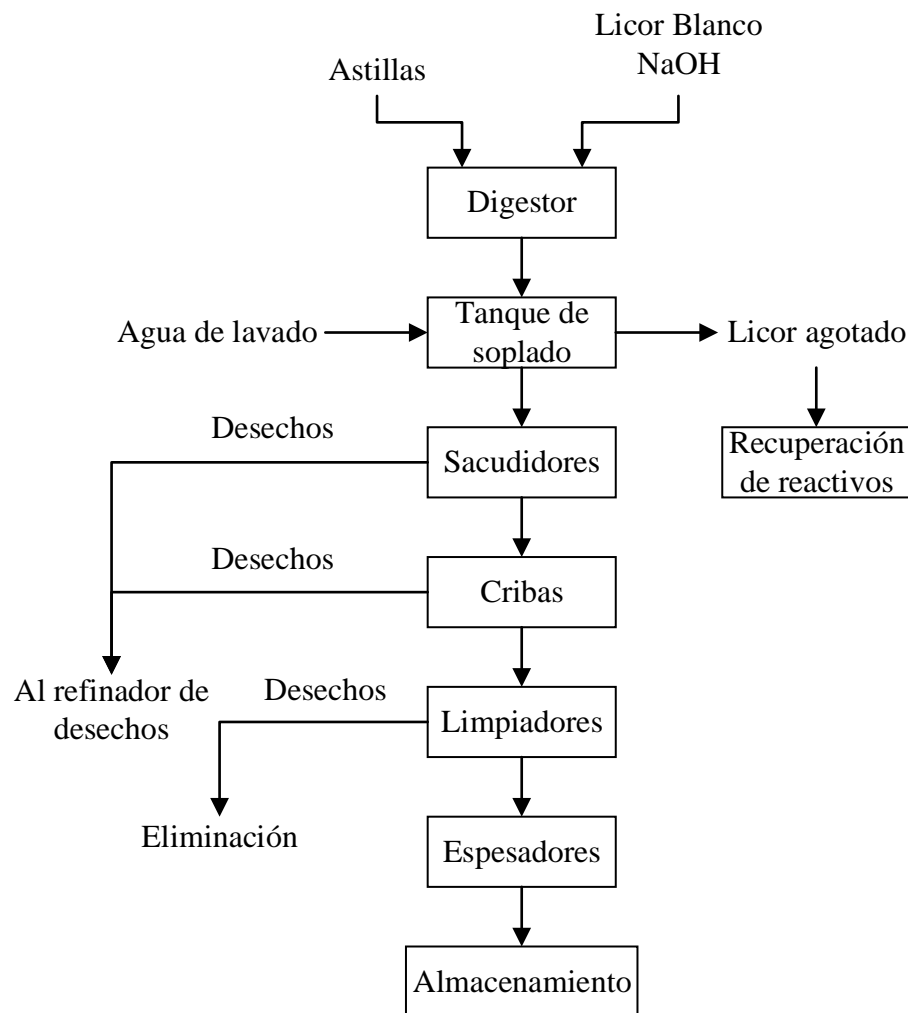
De acuerdo a Environmental Defense Fund (1996) y Saijonkari-Pahkala (2001) señalan que “a nivel mundial, la mayoría de las fábricas que utilizan fibras no maderables hacen uso de los procesos químicos como sosa, Kraft y sulfito, pero el método más usado a nivel comercial para pulpear especies no maderables sigue siendo el método a la sosa. Este proceso deja una mayor cantidad de carbohidratos insolubles en la pulpa y se obtiene mayor rendimiento que para el método Kraft. Sin embargo, las propiedades de resistencia mecánica y el contenido de lignina son similares en las pulpas producidas por ambos métodos” (Solano Hernandez, 2010).

A continuación, se describen los procesos de pulpeo mencionados:

1.10.1.2.1. Proceso a la sosa

Es el proceso más antiguo que se conoce y consiste en someter las materias primas, troceadas y acondicionadas, a una digestión con una concentración dada de hidróxido de sodio, a una temperatura y tiempo de cocción determinados, según la calidad de las pulpas que se deseen obtener (químicas o semiquímicas) y las características de las materias primas utilizadas. Se cargan las astillas y el licor al digestor bien sea intermitente o continuo. El licor blanco se carga para dar la relación correcta de productos químicos a madera, y, en el caso de los digestores intermitentes, el licor negro recirculado procedente de los lavadores se agrega también para alcanzar la relación deseada licor/madera. El digestor se calienta por vaporización directa o indirecta hasta llegar a una temperatura alta, en el margen de 160 a 180°C, y se mantiene allí hasta alcanzar el grado deseado de cocción. Después de terminada la digestión, las astillas cocidas y el licor gastado se descargan en un tanque de soplado. Las partículas no cocidas de mayor tamaño (nudos) se eliminan entonces utilizando cribas perforadas (nuderás) y separa de la pulpa mediante un lavado en contracorriente. A continuación, la pulpa se diluye hasta llegar a una consistencia baja, y se eliminan los contaminantes de pequeño tamaño mediante cribas finas, bien sea el tipo centrífugo o por presión, lo que en algunos casos se prosigue mediante limpiadores centrífugos. El material ya limpio se espesa a continuación y se almacena para subsecuente procesado (Delgado & Uribe, 2017).

Figura I-5: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado a la sosa



Fuente: Elaboración propia

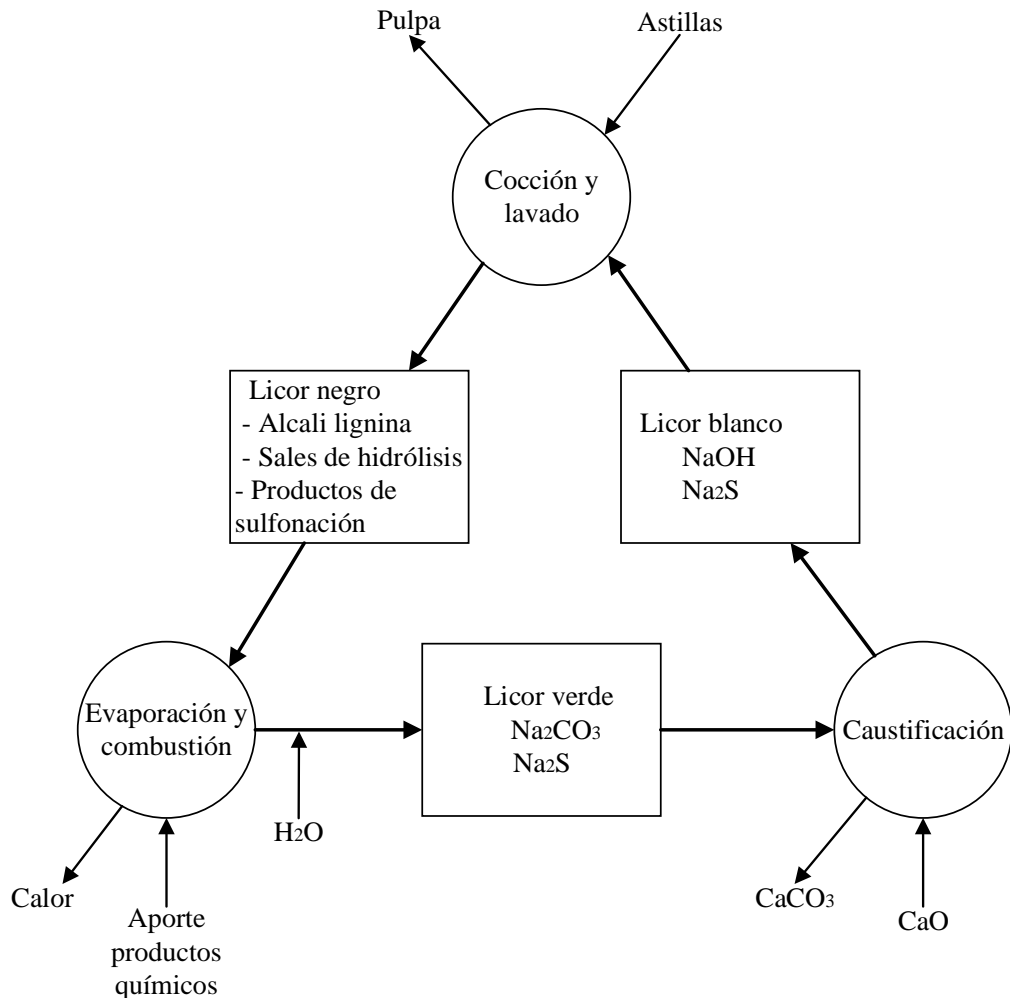
El proceso a la sosa tiene como principal ventaja que el licor blanco es fácil de preparar. Las pulpas obtenidas bajo este proceso tendrán un color claro, por lo que serán buenas para impresión. Sin embargo, este proceso puede deteriorar las fibras de celulosa, la lignina en cambio se transforma en sustancias solubles en álcali. Este proceso puede producir jabones con las grasas encontradas en la materia prima, por lo que el lavado debe hacerse inmediatamente. El proceso puede llegar a tener rendimientos de 45 a 50 % (Casey, 1990).

1.10.1.2.2. Proceso Kraft

El desarrollo del proceso Kraft se atribuye, usualmente a C. F. Dahl. En un esfuerzo por encontrar un sustituto para el costoso carbonato de sodio, experimentó con la adición de sulfato de sodio a la caldera de recuperación para reponer las pérdidas de productos químicos ocurridas durante las operaciones de cocción a la sosa. El sulfato fue químicamente reducido a sulfuro en la caldera, que de esta forma fue introducido en el licor del sistema, Dahl observó que el sulfuro aceleraba significativamente la deslignificación y producía una pulpa mucho más resistente. La secuencia de etapas en el pulpeado Kraft y proceso de recuperación se muestran esquemáticamente en la figura I-6. A continuación de la cocción (o digestión), el licor negro residual es extraído por lavado de la pulpa y tratado en una serie de etapas para recuperar los productos químicos y regenerar el licor de cocción (Smook, 1990).

El proceso de cocción (digestión) puede ser en continuo o discontinuo. En la cocción discontinua, el digestor se llena de astillas y se adiciona suficiente licor para cubrirlas. Después, el contenido se calienta de acuerdo a un programa predeterminado, normalmente por circulación forzada del licor de cocción a través de un intercambiador de calor. Por la parte superior del reactor se desgasan aire y otros gases no condensables por medio de una válvula de control de presión. La temperatura máxima se suele alcanzar después de 1 a 1,5 h, que permite a el licor de cocción impregnar las astillas. La cocción se mantiene entonces a temperatura máxima (usualmente en torno a 170 °C) durante 1 a 2 h para completar las reacciones de cocción. Después de la digestión, el contenido se descarga en un tanque de soplado donde las astillas ablandadas se desintegran en fibras; el vapor de revaporizado se condensa en un intercambiador de calor para proporcionar agua caliente para el lavado de la pulpa (Smook, 1990).

Figura I-6: Esquema del ciclo de licores Kraft



Fuente: (Smook, 1990)

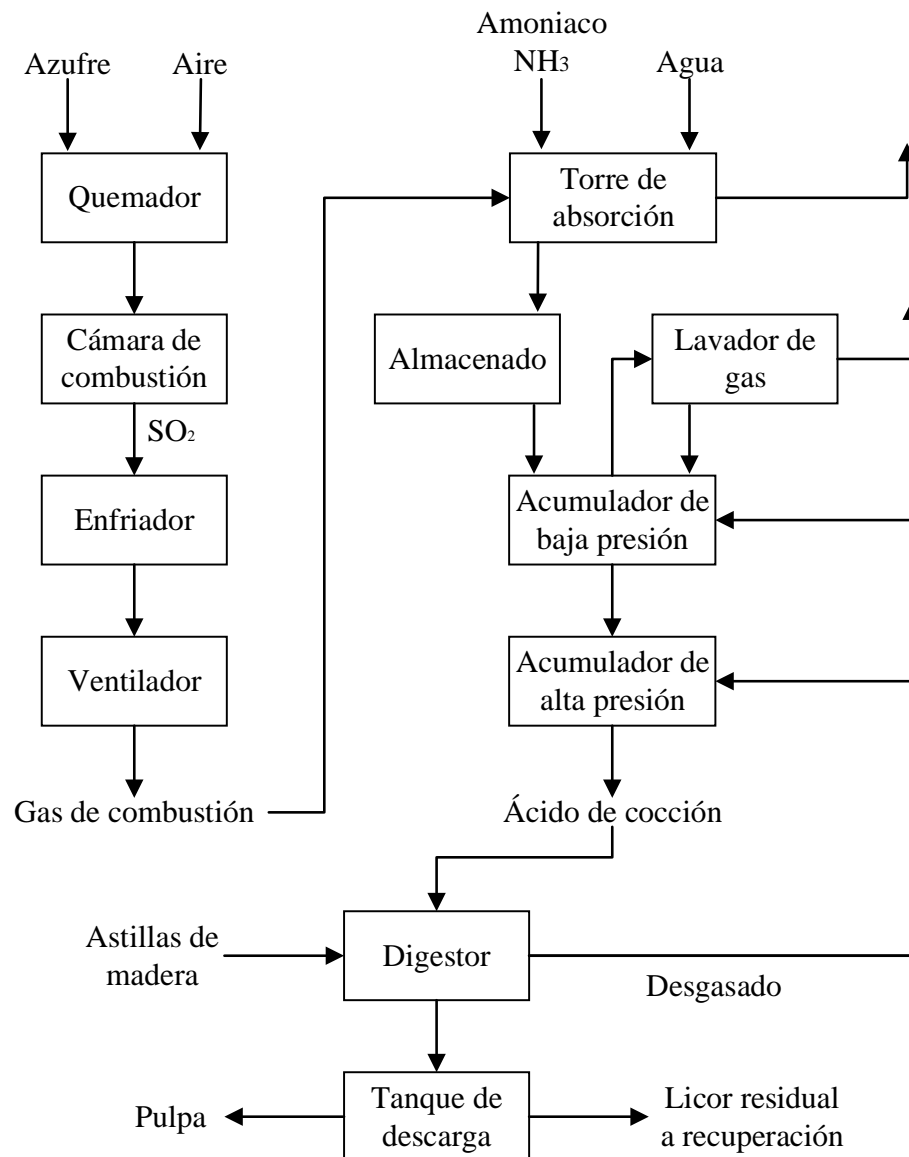
Las dos variables que más influyen en las reacciones del pulpeado Kraft son la concentración de álcali (medida por el álcali activo o el álcali efectivo) y la temperatura. Dentro del intervalo de temperatura normal de cocción (155 a 175 °C), la velocidad de deslignificación crece más del doble para cada incremento de 10 °C.

1.10.1.2.3. Proceso al sulfito

Un diagrama de flujo simplificado para un sistema de pulpeado al sulfito se muestra en la figura I-7. El licor de cocción se prepara, usualmente, por combustión de azufre para producir SO₂ gas y posterior absorción del SO₂ en una solución alcalina de la base. En

las fábricas al sulfito de calcio más antiguas, se utilizaba exclusivamente caliza en la torre de absorción de gas, que servía como material de relleno y como fuente de calcio para producir bisulfito de calcio. En las fábricas más modernas, se usa una de las bases solubles, en forma de NH_4OH , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o Na_2CO_3 , para absorber el SO_2 ; para proporcionar una mayor área de contacto en la torre de absorción, se utilizan rellenos inertes tales como las sillas berl (Smook, 1990).

Figura I-7: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado al sulfito con base amonio



Fuente: (Smook, 1990)

La operación de cocción se realiza de manera intermitente en un recipiente a presión recubierto de acero o acero inoxidable con revestimiento resistente al ácido. El digestor se carga primero con astillas, se tapa y se adiciona después suficiente ácido caliente, procedente del acumulador de alta presión, para casi llenar al digestor.

Cuando la temperatura y la presión se incrementan, el ácido caliente es absorbido rápidamente por las astillas. La reacción química no progresa en ningún momento basta que la temperatura excede los 110 °C, pero es importante que en esta etapa las fibras estén bien "impregnadas" con los reactivos de cocción. Una lenta subida de temperatura, una temperatura máxima relativamente baja (130 a 140 °C), y un largo tiempo global de cocción (6 a 8 h) son condiciones típicas para evitar reacciones de policondensación de la lignina no deseables. La velocidad de este proceso es pausada, y se necesita una cantidad elevada de reactivos, pero se tiene la ventaja de obtener pulpas de mayor blancura y de mayor resistencia.

Las variables más influyentes en la cocción al sulfito son el pH, la concentración de SO₂ libre, y la temperatura. Cuando el pH se desplaza desde el nivel correspondiente a la cocción al sulfito ácido (pH 1,5 a 2,0) al nivel de la cocción al bisulfito (pH 4,0 a 5,0), la velocidad de cocción se puede mantener utilizando temperaturas más altas. Normalmente, 140 °C es el nivel máximo considerado en la cocción al sulfito ácido de calcio, debido a las reacciones de policondensación que pueden ocurrir a temperaturas más elevadas. Cuando se utilizan bases monovalentes (usualmente a pH más altos), la temperatura se puede incrementar hasta 160 °C o más (Smook, 1990).

1.11. Factores a tomar en cuenta para la producción de pulpa

De acuerdo a Stephenson (1950) citado en (Solano Hernandez, 2010) menciona las principales variables de trabajo durante el proceso de pulpeo de la madera, sin embargo, estas pueden ser aplicables a fibras no maderables.

- Especie y calidad de la madera
- Tiempo de cocción
- Temperatura de cocción

- Relación de los productos químicos a la madera
- Concentración de los reactivos en el licor

1.11.1. Especie y calidad de la madera

La diferencia más marcada entre las maderas duras y suaves se encuentra en la longitud de sus fibras, así como en el contenido de celulosa, pentosas y lignina, dando como resultado una variación en cuanto a las propiedades de la pulpa obtenida. Las maderas de diferentes densidades requieren distintos tratamientos de cocción.

1.11.2. Tiempo de cocción

El tiempo de cocción está relacionado con otras variables, tales como la temperatura, la cantidad y la concentración del licor. Un aumento en una o más de estas variables, dentro de ciertos límites, disminuirá el tiempo para obtener pulpa con el mismo rendimiento y calidad.

1.11.3. Temperatura de cocción

La temperatura y el tiempo de cocción son variables dependientes: entre más alta sea la temperatura, menor será el tiempo de digestión. Una temperatura por debajo de los 170 °C aparentemente no aporta ninguna ventaja ni en el rendimiento ni en la calidad de la pulpa obtenida. Por encima de los 180 °C, la celulosa es muy susceptible a degradarse, particularmente a una temperatura de 200 °C.

1.11.4. Relación de los productos químicos a la madera

La relación entre los productos químicos y las astillas que se agreguen al reactor debe mantenerse por encima de un mínimo determinado, con el fin de producir pulpa mediante la eliminación de suficiente lignina para separar las fibras.

1.11.5. Concentración de los reactivos en el licor

La concentración de los reactivos en el licor de cocción está estrechamente relacionada con la relación de los productos químicos a la madera; la velocidad de la reacción química está determinada por la concentración de los reactivos de cocción.

1.12. Índices de Calidad de la Pulpa

1.12.1. Rendimiento Porcentual

Se define como rendimiento porcentual a la cantidad de pulpa obtenida para la cantidad de materia prima seca que ingresó multiplicado por cien.

1.12.2. Número Kappa

El número Kappa es un coeficiente adimensional, que es utilizado como un indicador de la cantidad de lignina remanente en las pulpas de celulosa luego de la cocción. El Número Kappa es el volumen (en ml) de permanganato de potasio (KMnO_4) 0,1N consumido por 1g de pulpa seca. Los resultados se corrigen para ser equivalentes a un consumo de permanganato de potasio del 50%, mediante el producto del consumo real medido en el ensayo por un factor de conversión. Este procedimiento es aplicable para pulpas cuyo rendimiento sea por debajo del 70%, provenientes de procesos químicos y semiquímicos (TAPPI T 236 cm-85).

El número Kappa es el factor numérico que indica el grado de deslignificación del material cocido (pulpa). Un número de Kappa alto indica una deslignificación deficiente y viceversa (que no se deslignifico). Un valor de Kappa de 30-35 es aceptable para pulpas para la obtención de papel tipo bond o afines, mientras valores entre 20-30 son adecuados para pulpas para papeles de decoración u otros que serán blanqueadas con tratamientos posteriores (Quihue Cabezas, 2014).

1.12.3. Alfacelulosa

Es definida como la fracción de celulosa no degradada o insoluble que se obtiene al someter una pasta química a una solución de NaOH al 17.5%. Esta fracción es considerada como la celulosa en su forma más pura, y su cantidad nos una referencia a propiedades como la capacidad a no degradarse por envejecimiento y conservar su resistencia (Grant, 1966).

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Metodología de investigación

En el cultivo del plátano los residuos generados como ser el pinzote, pueden ser utilizados como materia prima para la extracción de celulosa. La presente investigación brinda una alternativa para el aprovechamiento de este residuo, con la finalidad de obtener pulpa de celulosa. En primer lugar, se eligió la variedad de plátano de la cual se tomó el pinzote para obtener pulpa de celulosa, conociendo sus propiedades fisicoquímicas se buscó el método de obtención y los reactivos para realizar los análisis necesarios para caracterizar la pulpa de celulosa obtenida.

2.2. Selección del proceso experimental

Para la correcta selección del proceso a utilizar para la obtención experimental de pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano se efectuó mediante la realización del método de los factores ponderados. Este método realiza un análisis cuantitativo en el que se compara las diferentes alternativas, asignando un peso relativo a cada factor fundamental del proceso que refleje su importancia relativa fijando una escala de calificación.

De acuerdo a las referencias bibliográficas, entre los principales métodos para la producción de pulpa se destacan: el proceso a la sosa, Kraft y sulfito. Señalado los métodos para la obtención de pulpa de papel, se procede a realizar una matriz de decisión para la selección del método que se aplicara, se asigna una calificación de acuerdo a una escala predeterminada de uno a diez.

En la tabla II-1 se observa las calificaciones ponderadas, siendo el proceso adecuado aquel que acumule el mayor puntaje.

Tabla II-1: Escala de calificación por puntuación del 1 al 10

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	9-10
Muy buena	7-8
Buena	5-6
Regular	3-4
Mala	1-2

Fuente: Elaboración propia

Tabla II-2: Matriz de decisión para la selección del proceso de obtención de pulpa de celulosa

Factores	Peso asignado (%)	Proceso a la sosa		Proceso Kraft		Proceso al sulfito	
		Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado	Calificación	Valor ponderado
Simplicidad del proceso	25	9	22,5	7	17,5	6	13,5
Calidad de pulpa obtenida	20	8	16	7	14	9	14,4
Requerimiento de reactivos	20	10	20	8	16	6	12
Preparación del licor blanco	15	10	15	8	12	7	10,5
Requerimiento de energía	15	8	12	9	13,5	6	7,2
Velocidad del proceso	5	8	4	9	4,5	5	2
Total	100		89,5		77,5		59,6

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las tablas presentadas anteriormente se observa que el proceso a la sosa tiene una mayor ponderación final respecto al proceso Kraft y al proceso al sulfito, por lo que se escogió el proceso a la sosa.

2.3. Equipos

Los equipos empleados en la parte experimental fueron los siguientes:

- + Balanza Analítica
- + pHmetro
- + Licuadora
- + Agitador magnético
- + Estufa
- + Mufla
- + Bomba de vacío
- + Baño María
- + Cocina
- + Molino de discos
- + Molino de martillos
- + Tamizador
- + Extractor Soxhlet
- + Sistema de reflujo

Las especificaciones de los equipos mencionados se indican en el Anexo i del presente documento.

2.4. Materiales de laboratorio

En la realización de la parte experimental se utilizaron los siguientes materiales:

Tabla II-3: Descripción del material utilizado

Material	Tipo	Capacidad/tamaño	Cantidad
Vasos de precipitado	Vidrio borosilicato	100, 250, 1.000 ml	4
Probetas	Vidrio borosilicato	50, 500 ml	2
Matraz Erlenmeyer	Vidrio borosilicato	250 ml	1
Bureta	Vidrio borosilicato	50 ml	1
Caja Petri	Vidrio borosilicato	Mediana	2
Vidrio reloj	Vidrio pyrex	Mediano	1
Varilla	Vidrio pyrex	Mediana	1
Embudo	Vidrio borosilicato	Pequeño	1

Material	Tipo	Capacidad/tamaño	Cantidad
Termómetro	Vidrio	-10 a 200 °C	1
Desecador	Vidrio	Normal	1
Crisol	Porcelana	Pequeño	2
Pinza mariposa	Metálico	Mediana	1
Kitasato	Vidrio	1000 ml	1
Embudo Büchner	Plástico	Normal	1
Gotero	Plástico	2 ml	1
Soporte universal	Metálico	Normal	1
Espátula	Metálico	Pequeña	1
Papel filtro	-	Pliego	1
Olla a presión	Acero inoxidable	2.000 ml	1
Cuchillo	Acero inoxidable	Mediano	1
Cedazo y contramarco	Madera	22 x 28 cm	2
Tablas	Madera	30 x 30 cm	2
Tela	Fieltro	0.75 m	1
Colador	Plástico	Mediano	1
Balde	Plástico	5 l	2
Tupper	Plástico	330 ml	12
Jarra	Plástico	1,5 l	1

Fuente: Elaboración propia

2.5. Reactivos

Los reactivos empleados en la obtención de la pulpa de celulosa fueron:

- ✚ Hidróxido de sodio
- ✚ Agua destilada
- ✚ Hipoclorito de sodio

Los reactivos empleados en la caracterización del pinzote de plátano fueron:

- ✚ Etanol al 96 %
- ✚ Benceno
- ✚ Ácido sulfúrico 72 %
- ✚ Ácido acético 10 %
- ✚ Ácido acético 98 %

- ✚ Hidróxido de sodio 17,5 %
- ✚ Clorito de sodio

Los reactivos empleados en la caracterización de la pulpa de celulosa fueron:

- ✚ Hidróxido de sodio 17,5 %
- ✚ Ácido acético 98 %
- ✚ Ácido sulfúrico 4 N
- ✚ Permanganato de potasio 0,1 N
- ✚ Yoduro de potasio 1N
- ✚ Tiosulfato de sodio 0,2 N
- ✚ Almidón 0,2 %

2.6. Diseño experimental

El diseño experimental consiste en plantear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de analizar los efectos de dos o más factores de interés sobre una variable respuesta. Está conformado por niveles (valores que se le asignan a cada variable estudiada de un diseño experimental) y tratamientos (combinación de niveles de todas las variables estudiadas). Tiene la función de decidir cuantas y cuales pruebas o tratamientos se correrán en el proceso y cuantas repeticiones de cada uno.

Cuando se desea examinar el efecto simultáneo de varios factores, sobre una característica de estudio, se presenta el problema del diseño de tratamientos, o la experimentación factorial. Se experimenta dos tipos fundamentales de experimentos factoriales: i) el factorial completo, el cual ensaya todas las posibles combinaciones de tratamientos que se generan con los distintos niveles de los factores de estudio.

Dentro de estos factoriales, pueden distinguirse los factoriales simétricos y los asimétricos; los primeros comprenden el mismo número de niveles de cada factor, los restantes ensayan números distintos de niveles de los factores de estudio. ii) el factorial incompleto, el cual ensaya solo algunas de las posibles combinaciones de tratamientos que pueden generarse.

El diseño factorial que se tomó en cuenta para realizar el presente trabajo de investigación, fue el factorial completo simétrico (2^2), 2 niveles y 2 factores.

2.6.1. Diseño factorial a dos niveles

Este tipo de diseño tiene por objeto estudiar el efecto de la respuesta de “k” factores cada uno en dos niveles, es por ello que se conocen como factoriales a 2 niveles o 2^k , con frecuencia se califican a los niveles como “alto” (+) y “bajo” (-).

El diseño factorial completo requiere que cada uno de los niveles de cada factor se de en todos los niveles de todos los otros factores, lo que da un total de 2^k combinaciones de tratamientos.

2.6.2. El modelo de regresión

En un diseño factorial 2^k es fácil expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión. Aunque para este tipo de experimentos se pueden usar modelos de efectos como de promedios, el modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo. La ecuación para un modelo de regresión sería:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad \text{Ec. (II-1)}$$

Donde:

y: Modelo de regresión

X_1 : Variable codificada

X_2 : Variable codificada

β : Coeficientes de regresión

ε : Error.

Para la estimación de efectos se puede aplicar las siguientes fórmulas:

Para el efecto A.

$$A = \frac{1}{2^n} \{[a + ab] - [(1) + b]\} \quad \text{Ec. (II-2)}$$

Para el efecto B

$$B = \frac{1}{2n} \{[b + ab] - [(1) + a]\} \quad \text{Ec. (II-3)}$$

Para la interacción A*B

$$A * B = \frac{1}{2n} \{[(1) + ab] - [a + b]\} \quad \text{Ec. (II-4)}$$

Donde:

n: Número de réplicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

Estas fórmulas permiten saber si el efecto es significativo o es irrelevante.

Para la suma de cuadrados es muy importante, pues ayuda a estimar el análisis de varianza, se puede aplicar las siguientes fórmulas.

Suma de cuadrados para A.

$$SS_A = \frac{\{[a+ab]-[(1)+b]\}^2}{4n} \quad \text{Ec. (II-5)}$$

Suma de cuadrados para B.

$$SS_B = \frac{\{[b+ab]-[(1)+a]\}^2}{4n} \quad \text{Ec. (II-6)}$$

Suma de cuadrados para la interacción A*B.

$$SS_{A*B} = \frac{\{[(1)+ab]-[a+b]\}^2}{4n} \quad \text{Ec. (II-7)}$$

Donde:

SS: Suma de cuadrados

n: Número de réplicas

(1): Resultado del primer tratamiento

a: Resultado del segundo tratamiento

b: Resultado del tercer tratamiento

ab: Resultado del cuarto tratamiento

Al calcular las sumas de cuadrados para los efectos principales A y B, y el efecto de interacción AB, es conveniente presentar las salidas totales de las combinaciones de tratamiento junto con los signos algebraicos apropiados para cada contraste, como se observa en la tabla II-4. Los efectos principales se obtienen como comparaciones simples entre los niveles alto y bajo. Por lo tanto, se asigna un signo positivo para la combinación de tratamientos que esté en el nivel alto de un factor dado, y uno negativo a la combinación de tratamientos del nivel bajo. Los signos positivo y negativo para el efecto de interacción se obtienen multiplicando los signos correspondientes de los contrastes de los factores de la interacción.

Tabla II-4: Signos para los contrastes en un experimento factorial 2^2

Combinación de tratamientos	Efecto factorial		
	A	B	AB
(1)	-	-	+
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	+

Fuente: (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012)

2.7. Construcción del diseño factorial 2^k

En el presente trabajo se empleará un diseño factorial 2^k , cada factor se estudia a dos niveles: nivel bajo (-) y nivel alto (+).

Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

Existen factores que pueden afectar en mayor o menor proporción al proceso de obtención de pulpa de papel y papel, entre ellos se encuentran: porcentaje de sosa y tiempo de cocción. Estos factores pueden condicionar la variable de respuesta tal como lo es el rendimiento del proceso.

Si bien la temperatura de cocción y la presión son importantes en el proceso de obtención de pulpa de celulosa, no se cuenta con un digestor automatizado con el que se pueda controlar estos factores, es por eso que se estudió como responde el rendimiento del proceso (y) a factores tales como porcentaje de sosa (x_1) y tiempo de cocción (x_2) que si pueden ser manipulados.

Los factores escogidos y el dominio experimental se muestran a continuación:

Tabla II-5: Niveles y factores que intervienen

Factores (k)	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
A: Porcentaje de sosa (%)	10	20
B: Tiempo de cocción (min)	60	90

Fuente: Elaboración propia

Para conocer los efectos de un factor es suficiente hacerlo variar entre los extremos de su dominio experimental, entre el nivel -1 y +1. Además de su variación, se debe realizar cada posible combinación de dichos niveles en todos los factores. Este tipo de experimentos permiten estudiar el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable.

Todas estas combinaciones están contempladas en el diseño factorial completo 2^2 . En total 4 experimentos correspondientes a 2 niveles de % de sosa por 2 niveles del tiempo de cocción. Además, se hará tres replicas para cada experimento, haciendo un total de 12 experimentos.

Tabla II-6: Matriz de experimentos

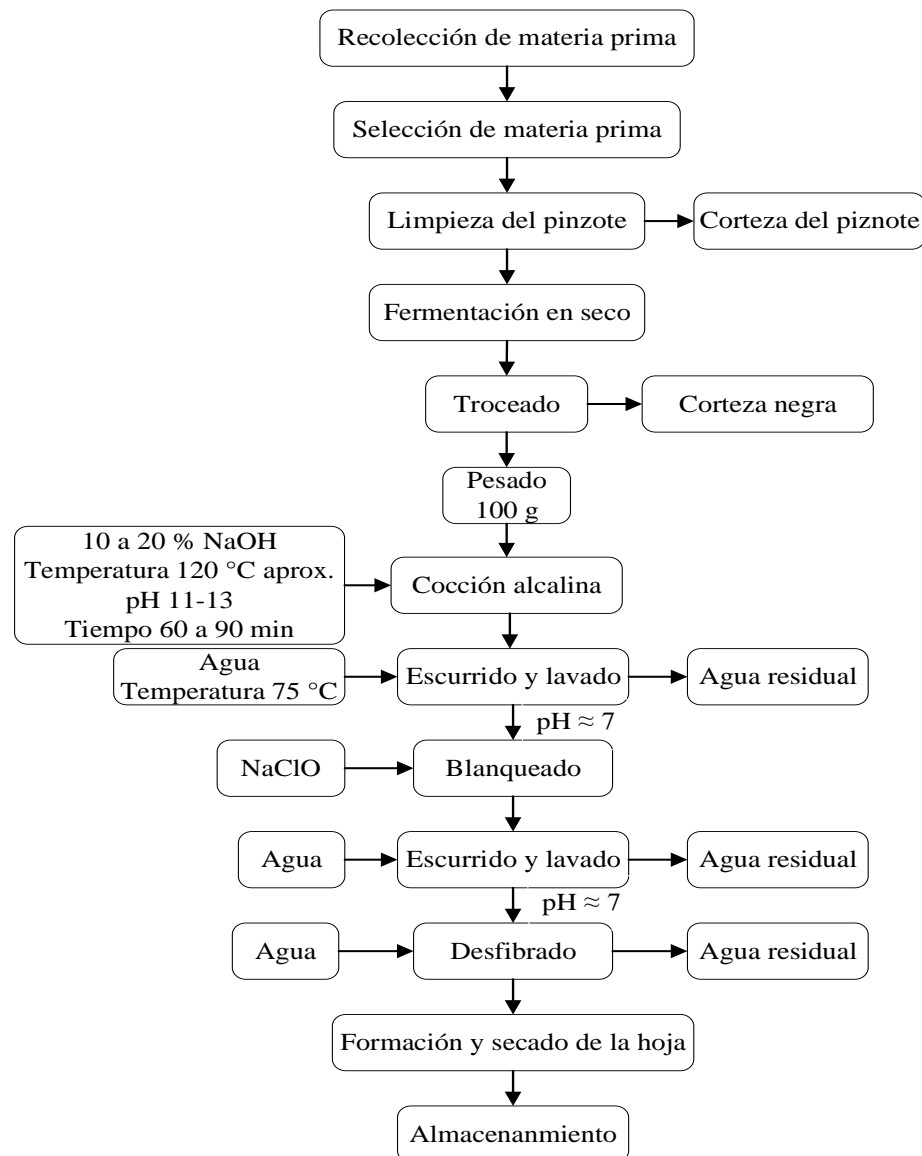
N°	Matriz de experimentos		Plan de experimentación		
	A	B	Porcentaje de sosa (%)	Tiempo (min)	Rendimiento en base seca (%)
1	-1	-1	10	60	y ₁
2	+1	-1	20	60	y ₂
3	-1	+1	10	90	y ₃
4	+1	+1	20	90	y ₄
5	-1	-1	10	60	y ₅
6	+1	-1	20	60	y ₆
7	-1	+1	10	90	y ₇
8	+1	+1	20	90	y ₈
9	-1	-1	10	60	y ₉
10	+1	-1	20	60	y ₁₀
11	-1	+1	10	90	y ₁₁
12	+1	+1	20	90	y ₁₂

Fuente: Elaboración propia.

2.8. Diseño del proceso experimental seleccionado para la obtención de pulpa de celulosa

Identificado el proceso de obtención de pulpa de papel, a continuación, se describe un diagrama del proceso.

Figura II-1: Diagrama de bloques del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel



Fuente: Elaboración propia

Cada una de las etapas del proceso se describe a continuación:

2.8.1. Recolección de la materia prima

El pinzote de plátano (*Musa balbisiana*) proveniente del trópico boliviano es un residuo de cosecha que se acumula en los mercados concentradores de productos agrícolas, por ende, se obtuvo de los mismos.

2.8.2. Selección de la materia prima

La selección del pinzote se basó en escoger aquellos que se encontraban en buen estado, sin presentar signos de descomposición, daño o alteración.

Figura II-2: Selección del pinzote de plátano



Fuente: Elaboración propia

2.8.3. Limpieza del pinzote

Consiste simplemente en la separación de la corteza (parte externa) que envuelve las fibras.

Figura II-3: Limpieza del pinzote de plátano



Fuente: Elaboración propia

2.8.4. Fermentación en seco

El pinzote se acondicionó mediante una fermentación en seco, se almacenó en un contenedor de plástico, y se cubrió totalmente con plástico. De esta manera permaneció un periodo de entre quince a veinte días, aislado del oxígeno externo y con su propia humedad. Esto produce una fermentación donde los azúcares, almidones, pectinas gomas, etc., se descomponen. Este proceso favorece la posterior cocción y el refinado.

Figura II-4: Fermentación del pinzote de plátano



Fuente: Elaboración propia

2.8.5. Troceado

Una vez terminado el periodo de fermentación, los pinzotes de plátano se lavaron con agua, ya limpios con ayuda de un cuchillo afilado se retiró la corteza y se procedió a trocear. El troceado se realizó de manera tal que cada cubito de pinzote mantenga homogeneidad.

Figura II-5: Troceado del pinzote de plátano



Fuente: Elaboración propia

2.8.6. Pesado

Para cada experimento, se pesaron 100 gramos de pinzote en una balanza analítica, para calcular posteriormente el rendimiento del proceso de obtención.

Figura II-6: Pesado del pinzote de plátano



Fuente: Elaboración propia

2.8.7. Cocción alcalina

El proceso de cocción alcalina es necesario para la eliminación de la lignina, componente de la planta que rodea y enmascara la fibra de celulosa. Para este tratamiento se ensayaron cocciones de la materia prima, el ciclo de cocción se cumplió hirviendo la muestra de manera continua y uniforme en una olla a presión, simulando un digestor industrial, a temperatura constante (120 °C aprox.) y presión constante, variando el porcentaje de sosa (10 – 20 %) en base a materia prima seca y el tiempo de cocción (60 – 90 min).

Figura II-7: Cocción alcalina



Fuente: Elaboración propia

2.8.8. Ecurrido y lavado

Después de cocinado el pinzote se obtuvo la pulpa, se escurrió y exprimió por medio de un cedazo hasta retirar el licor negro; luego se la puso en contacto con abundante agua caliente (75 °C) con el fin de eliminar la lignina y solución alcalina. El lavado termina cuando el agua de lavado llega a un pH neutro.

Figura II-8: Ecurrido y lavado de pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia

2.8.9. Blanqueado

Una vez obtenida la pulpa de celulosa, esta se procedió a aclarar mediante blanqueo con hipoclorito de sodio al 10% durante un periodo de 24 horas. De esta forma la fibra toma un color rubio claro.

Figura II-9: Blanqueado de la pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia

2.8.10. Escurrido y lavado

Después de blanquear la pulpa, se escurrió y exprimió por medio de un cedazo hasta retirar la lejía, el lavado se efectúa con abundante agua hasta la medición de un pH neutro.

Figura II-10: Escurrido y lavado de la pulpa de celulosa blanqueada



Fuente: Elaboración propia

2.8.11. Desfibrado

Una vez obtenida la pulpa, esta se desfibra con la ayuda de una licuadora por 4 minutos aproximadamente, para aumentar la unión por puentes de hidrógeno entre fibras. Aquí los haces fibrosos de celulosa se hinchan y, sobre todo, permiten que en las puntas se formen fibrillas a manera de “escoba”, que son las que facilitan las uniones antes mencionadas.

Figura II-11: Desfibrado de pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia

2.8.12. Elaboración de mezcla

Para la formación de la lámina de papel se realiza una mezcla de pulpa blanqueada con agua de tal forma la disolución alcance una consistencia adecuada entre 2,8 y 3,2 % según (Smook, 1990).

Figura II-12: Elaboración de mezcla

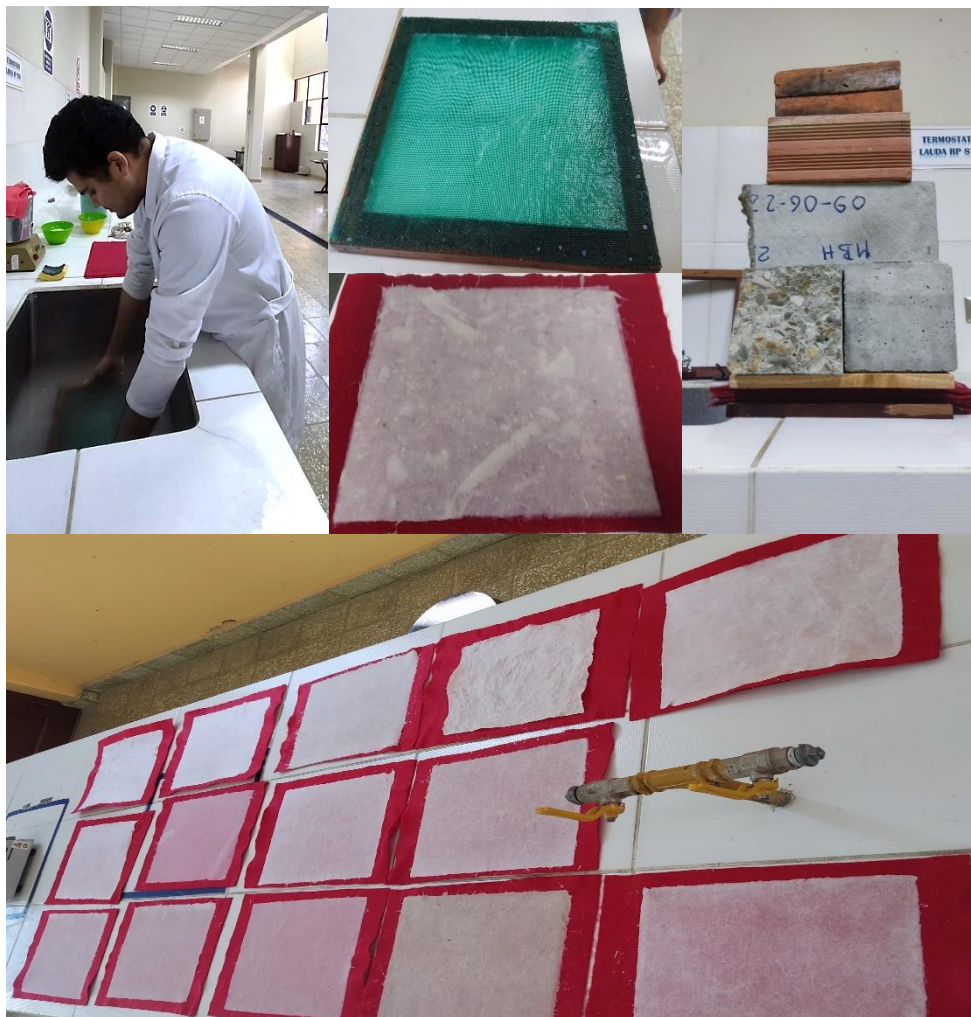


Fuente: Elaboración propia

2.8.13. Formación y secado de la hoja

Para darle más validez al trabajo se llegó a obtener papel. Consiste en sumergir el tamiz en una tina que contiene pulpa de celulosa en suspensión acuosa. Al sacar el tamiz de la tina y esperar que haya drenado, la hoja se deposita sobre un fieltro o se recubre con otro. Posteriormente se prensa la hoja para extraer el máximo de agua, la lámina entre las telas es secada al aire libre mientras está sujeta a una superficie plana con el fin de que conserve esta forma al cumplirse esta etapa. Una vez seca se las separa de las telas.

Figura II-13: Formación y secado de la hoja

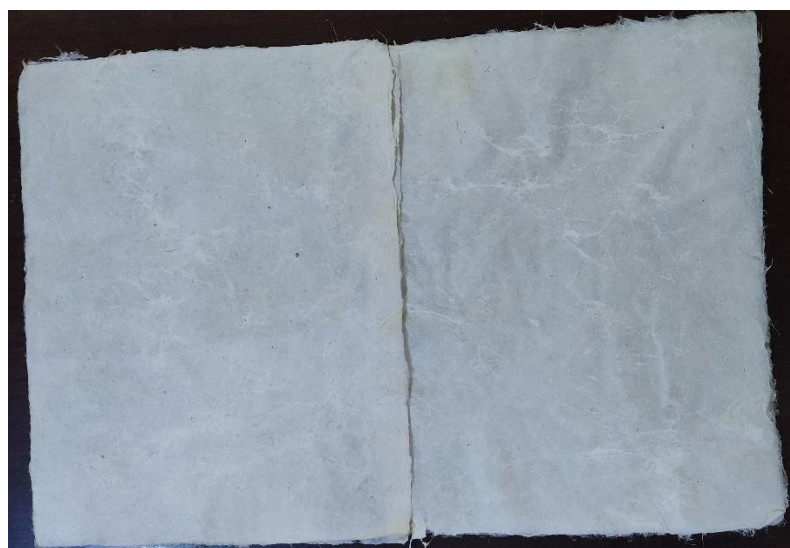


Fuente: Elaboración propia

2.8.14. Almacenamiento

Las hojas secas son recolectadas y guardadas en un lugar libre de humedad para su conservación.

Figura II-14: Hojas de papel



Fuente: Elaboración propia

2.9. Caracterización de la materia prima

El pinzote de plátano fue sometido a pruebas de contenido de humedad, pH, densidad, contenido de cenizas, solubles, lignina, α -celulosa y holocelulosa.

Tabla II-7: Normas aplicadas para la caracterización fisicoquímica del pinzote de plátano

Parámetro	Norma
Humedad	TAPPI T 412 om-94
pH	Medición
Densidad	Cálculo
Cenizas	TAPPI T 412 om-94
Solubles en alcohol-benceno	TAPPI T 204 m-54
Lignina	TAPPI T 13 os-54
α -celulosa	ANSI/ASTM D1103-60
Holocelulosa	ASTM D-1104

Fuente: Elaboración propia

2.9.1 Determinación de humedad

Este análisis se realizó sobre la base de la norma TAPPI T 412 om-94 de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos. El contenido de agua presente en la materia prima es un dato requerido para su correcta caracterización, pero también se utiliza para realizar el resto de análisis, en los cuales es necesario conocer la cantidad de materia prima disponible.

Se pesa 1 g de materia prima en base húmeda en una cápsula y se la coloca en la estufa a temperatura de ± 105 °C de 4 a 5 horas y luego de eso se lleva la muestra al desecador.

Se pesa el material desecado y se obtiene el porcentaje de humedad mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad \text{Ec. (II-8)}$$

2.9.2. Determinación de pH

Se tomó una muestra de pinzote de plátano, que fue tamizada, se colocaron 2 gramos de muestra en un vaso de precipitado de 100 ml a la cual se le agregaron 20 ml de agua destilada para tener una relación 1:10. Con el fin de estar en agitación constante se le colocó un agitador magnético. Se puso en agitación por 4 horas. Una vez pasado el tiempo, se dejó reposar por 1 hora, una vez asentada la muestra se procedió a filtrar. Se filtró y se midió el pH.

2.9.3. Determinación de densidad

La muestra para la determinación de la densidad se extrajo de la parte central del pinzote. El peso se determinó con una balanza analítica. El volumen de la muestra se determinó utilizando el método de desplazamiento de agua en una probeta graduada.

La densidad se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ec. (II-9)}$$

2.9.4. Determinación de cenizas

Este análisis se realizó sobre la base de la norma TAPPI T 412 om-94 de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos.

El porcentaje de cenizas es una medida que nos indica la cantidad de minerales o componentes inorgánicos que ingresa con la materia prima.

Para llevar a cabo este análisis, se pesó en balanza analítica 1 g de muestra, la cual fue previamente sometida a desecación, en una capsula y esta es ingresada en la mufla, donde se elevó gradualmente la temperatura hasta 550 °C, manteniendo esa temperatura durante tres horas.

Se pesaron las cenizas y se determinó el porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{\text{Peso de ceniza}}{\text{Peso de muestra en base seca}} * 100 \quad \text{Ec. (II-10)}$$

2.9.5. Determinación de solubles en alcohol-benceno

Este análisis se realizó sobre la base de la norma TAPPI T 204 m-54 de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos.

En un cartucho confeccionado con papel filtro, se introdujo 5 g de muestra tamizada y se extrajo durante 8 horas en el extractor Soxhlet con 200 ml de una mezcla de alcohol-benceno (33 y 67 partes). El equipo debe destilar a una velocidad tal de forma que de una sifonada por hora. Terminada la extracción, se recogió el residuo y se lo seco en estufa a 105°C durante una hora. Se peso el residuo y se calculó los solubles mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de solubles en Alcohol – Benceno} = \frac{\text{Peso de residuo}}{\text{Peso de muestra en base seca}} * 100 \quad \text{Ec. (II-11)}$$

2.9.6. Determinación de lignina

Este análisis se realizó sobre la base de la norma TAPPI T 13 os-54 de la Asociación Técnica de la Industria de pulpa y Papel de los Estados Unidos.

En un vaso de precipitación, se colocó 1 gramo de la muestra seca previamente extraída con alcohol-benceno. Se adicionó 15 ml de ácido sulfúrico al 72% a 12 °C, se agitó la

mezcla por 2 horas. Luego se agregó 560 ml de agua destilada y se llevó a ebullición con un sistema a reflujo por 4 horas. La mezcla se filtró al vacío y se lavó con agua destilada caliente (70 °C). Se dejó secar en una estufa a 103 °C hasta peso constante.

La ecuación para la determinación de lignina es la siguiente:

$$\% \text{ de lignina} = \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso de la muestra seca}} * 100 \quad \text{Ec. (II-12)}$$

2.9.7. Determinación de α -celulosa

Se realizó determinación de α -celulosa según la metodología (ANSI/ASTM D1103-60), este método abarca la determinación indirecta del contenido de celulosa, ya que es un polisacárido natural que se encuentra formado principalmente de glucosa, lo que permite por su estructura resistir al ataque alcalino mientras que la hemicelulosa no lo resiste, por lo cual es un método de determinación directa para α -celulosa. La metodología utilizada fue:

- Se tomó 1g de pinzote de plátano libre de extraíbles y se transfirió a un vaso de precipitado de 100 ml, adicionando 10 ml de NaOH al 17,5 %, agitando y dejando reposar por 2 minutos, para luego agitar nuevamente y dejar en reposo 3 minutos.
- Posteriormente, se adicionaron 5 ml de NaOH al 17,5 %, se agitó y dejó reposar 5 minutos más, repitiendo este último paso dejando en reposo 30 minutos en baño María a $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Luego del tiempo establecido se agregó 30 ml de agua destilada, se agitó y dejó reposar por 1 hora.
- Posteriormente del tiempo anterior la muestra se filtró al vacío con papel filtro previamente tarado, lavando con una solución preparada de 33 ml de agua destilada y 25 ml de la solución de NaOH al 17,5 %.
- Inmediatamente se realizó un lavado con 30 ml de agua destilada, y se dejó de aplicar vacío, después se agregó 15 ml de una solución al 10 % de ácido acético y después de 3 minutos nuevamente se aplicó vacío para posteriormente lavarse finalmente con 50 ml de agua destilada aplicando vacío.

- La muestra fue llevada a estufa contenida en una caja Petri, a una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 horas, luego se transfirió a un desecador hasta peso constante. El porcentaje de celulosa se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\alpha - \text{celulosa} = \frac{(PM-PL)*(PLE)*100}{PTM} \quad \text{Ec. (II-13)}$$

Donde:

PM = Peso anhidro de la muestra tarada

PL = Peso de lignina en 1 g de muestra.

PLE = Peso de pinzote libre de extraíbles.

PTM = Peso de pinzote total, antes de la extracción de solubles.

2.9.8. Determinación de holocelulosa

Este método emplea ácido acético, que acidifica el medio y se convierte en dióxido sódico que permite degradar la lignina solubilizándola y clarificando la muestra. Esta se determinó siguiendo la norma ASTM D-1104. Se tomaron 2 g aproximados de muestra tras extracciones la cual se agregaron a un matraz Erlenmeyer cuello no esmerilado y se puso a baño María a una temperatura de $80 - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez alcanzada la temperatura se agregaron 1,5 g de clorito sódico en 160 ml de agua destilada, que previamente se le añadieron 10 gotas de ácido acético glacial, se tapona y se deja reposar 1 hora. Pasado el tiempo se agregó nuevamente 1,5 g de clorito sódico y 10 gotas de ácido acético glacial y se dejó reposar 1 hora, el proceso se repite hasta que la muestra se observe blanca, por lo menos 3 veces se repite. Se filtró, se lavó con agua destilada, se secó en estufa y se pesó en balanza analítica.

La ecuación para la determinación de holocelulosa es la siguiente:

$$\% \text{ de holocelulosa} = \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso de la muestra seca}} * 100 \quad \text{Ec. (II-14)}$$

2.10. Caracterización del producto: Pulpa de celulosa

Para la caracterización fisicoquímica de la pulpa de celulosa se siguieron los métodos de análisis descritos por las normas TAPPI.

Tabla II-8: Normas aplicadas para la caracterización fisicoquímica de la pulpa de celulosa

Parámetro	Norma
Humedad	TAPPI T 412 om-94
Cenizas	TAPPI T 211 m-59
α -celulosa	TAPPI T 203 os-61
β -celulosa	TAPPI T 203 os-61
γ -celulosa	TAPPI T 203 os-61
Número Kappa	TAPPI T 236 cm-85
Lignina	TAPPI T 236 cm-85

Fuente: Elaboración propia

2.10.1. Determinación del contenido de humedad

De acuerdo a la norma TAPPI T 412 om-94, importante para la determinación del contenido de la celulosa, referida a la materia prima seca, que es la base sobre el cual generalmente se comparan muestras diferentes, en la cual se usa un simple secado en estufa, para fines académicos para determinar un análisis completo de la pulpa, es necesario determinar cada constituyente. Según la norma la temperatura de la estufa debe estar entre $100 - 105^{\circ} \text{C}$, en intervalos de 3 horas donde el peso no tenga variaciones mayores a 0,1% del peso húmedo de la muestra.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad \text{Ec. (II-15)}$$

2.10.2. Determinación de cenizas

Este análisis se realizó sobre la base de la norma TAPPI T 211 m-59 de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos.

El porcentaje de cenizas es una medida que indica la cantidad de minerales o componentes inorgánicos que ingresa con la materia prima.

Para llevar a cabo este análisis, se pesó en balanza analítica 1 g de muestra, la cual fue previamente sometida a desecación, en una cápsula y esta es ingresada en la mufla, donde se elevó gradualmente la temperatura hasta $575^{\circ} \text{C} \pm 25$, manteniendo esa temperatura durante tres horas.

Se pesaron las cenizas y se determinó el porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{\text{Peso de ceniza}}{\text{Peso de muestra en base seca}} * 100 \quad \text{Ec. (II-16)}$$

2.10.3. Determinación de Alfa, Beta y Gamma celulosa

Se determina usando la norma TAPPI T 203 os-61. El fundamento del método se basa en la definición que se ha dado al hablar de estos tipos de celulosas: la parte insoluble en sosa al 17,5 % (en peso), 212 g/l es alfa celulosa, la parte soluble pero después precipitable por ácido es la beta celulosa; el resto será la gamma celulosa.

Se parte de una cantidad pesada a la humedad ambiente, aproximadamente 5 g; en muestra aparte se determina la sequedad de la pasta en estufa hasta peso constante.

La muestra a ensayar, se coloca en un vaso y se le agregan 50 ml de solución de hidróxido de sodio al 17,5 % en peso a temperatura ambiente; se deja diez minutos para que la pasta se impregne bien, y al cabo de éstos se procede a desintegrar la pasta con varilla de vidrio; una vez perfectamente desintegrada, se añaden otros 50 ml de igual concentración, se agita muy bien y se deja en reposo veinte minutos más. A continuación, se diluye con agua destilada (unos 200 ml) y se filtra en un crisol filtrante al vacío. Se da por último un lavado hasta que el agua salga neutra. El crisol filtrante se seca en estufa hasta peso constante, Así se sabrá el peso P de celulosa noble más lignina y cenizas; como estas cenizas se habrán determinado aparte, se descontarán del peso P y se tendrá el peso P₁ de α-celulosa contenido en la cantidad inicialmente pesada; como, en muestra aparte, se determina la sequedad de la muestra ensayada, sea esta S, se tendrá:

Peso bruto de nuestra sometida a ensayo: m (g)

Sequedad de esta muestra: S (%)

$$\text{Peso de muestra seca: } \frac{m*S}{100} \quad \text{Ec. (II-17)}$$

Peso seco de α-celulosa: P₁ (g)

$$\% \text{ de } \alpha\text{-celulosa: } \frac{P_1}{\frac{m*S}{100}} * 100 \quad \text{Ec. (II-18)}$$

Al líquido recogido de la filtración se le agregan 50 ml de ácido acético concentrado, se agita y se deja en reposo tres horas a 40-50 °C; después se filtra en un filtro tarado (papel de filtro) y se seca hasta peso constante, después se pesa. El peso total P menos la tara del papel de filtro t nos dará el peso de β -celulosa, $P_2 = P - t$

El porcentaje de β -celulosa se determinará como en el caso de la α -celulosa:

$$\% \text{ de } \beta\text{-celulosa: } \frac{P_2}{\frac{m \cdot S}{100}} * 100 \quad \text{Ec. (II-19)}$$

Por último, la γ -celulosa se determinará por diferencia.

$$\% \text{ de } \gamma\text{-celulosa: } 100 - \% \text{ de } \alpha\text{-celulosa} + \% \text{ de } \beta\text{-celulosa} \quad \text{Ec. (II-20)}$$

2.10.4. Determinación del número Kappa y porcentaje de lignina

El número de Kappa se determina usando la Norma TAPPI T 236 cm-85.

- Se pesa la cantidad de muestra que se calcula consumirá aproximadamente el 50% de la solución de permanganato de potasio usada en el ensayo. El consumo de permanganato de potasio debe estar entre el 30 y 70 % para cumplir con la Norma. Dicha condición se logra variando el peso de muestra.
- El ensayo se realiza por duplicado. Al mismo tiempo que se pesa la muestra, se realizará la determinación de sequedad, pesando aproximadamente 2 g de muestra y secándola en estufa a 105°C.
- Desintegrar la muestra en 500 ml de agua destilada, hasta obtener una suspensión homogénea. Transferir, la suspensión, al vaso de reacción agregando agua destilada hasta un volumen total de 750 ml.
- El vaso de reacción se coloca en un baño de temperatura constante a $25 \pm 0,2$ °C, la que se mantendrá durante todo el ensayo. El contenido del vaso se agita usando un agitador mecánico.
- En un vaso de precipitado, se colocan 100 ml de solución de permanganato de potasio 0,1N + 100 ml de ácido sulfúrico 4N, el que también estará acondicionado a $25 \pm 0,2$ °C (A).

- Se agrega el contenido de (A) al vaso de reacción, enjuagándolo con 50 ml de agua destilada. Simultáneamente se pone en marcha el cronómetro. El volumen total debe ser de 1000 ± 5 ml.
- Al transcurrir exactamente 10 minutos, se corta la reacción agregando 20 ml de IK 1N e inmediatamente el iodo liberado se titula con tiosulfato de sodio 0,2N, usando sol. De almidón al 0,2 %, como indicador cerca del punto final.
- Se debe realizar la determinación de un blanco (por duplicado), usando exactamente el mismo procedimiento dado anteriormente, pero sin la muestra de pulpa.

El número de Kappa se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{p \cdot f}{w} \quad p = \frac{(b-a) \cdot N}{0.1} \quad \text{Ec. (II-21)}$$

donde:

K= N° de Kappa.

f = factor para corregir a 50% el consumo de permanganato de potasio, dependiendo del valor de p.

w = peso de muestra de pulpa seca, g.

p = cantidad de permanganato de potasio 0,1N realmente consumidos por la muestra ensayada, ml.

b = cantidad de tiosulfato consumido en la determinación del blanco, ml.

a = cantidad de tiosulfato consumido por la muestra ensayada, ml.

N= normalidad del tiosulfato de sodio.

Tabla II-9: Factor “f” corregido a diferentes porcentajes de $KMnO_4$ 0.1N consumidos

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	0,958	0,960	0,962	0,964	0,966	0,968	0,970	0,973	0,975	0,977
40	0,979	0,981	0,983	0,985	0,987	0,989	0,991	0,994	0,996	0,998
50	1,000	1,002	1,004	1,006	1,008	1,011	1,013	1,015	1,017	1,019
60	1,022	1,024	1,026	1,028	1,030	1,033	1,035	1,037	1,039	1,042
70	1,044									

Fuente: Norma TAPPI T 236 cm-85

A demás con la temperatura promedio de la reacción se corrige el número de Kappa con la siguiente relación:

$$K_{\text{corregido}} = K_{\text{calculado}} * [1 + 0.013 * (15 - t)] \quad \text{Ec. (II-22)}$$

Con el resultado obtenido se puede calcular la cantidad de lignina presente expresada en porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de lignina} = 0,13 * K \quad \text{Ec. (II-23)}$$

2.11. Balance de materia

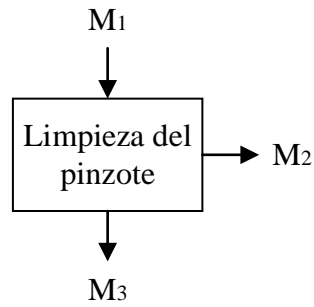
Se llevó a cabo el balance de materia para determinar los flujos de masa y las pérdidas que existen en el proceso.

El cual se realizó la obtención de pulpa de celulosa a partir de 500 g de pinzote de plátano. Para efectuar el balance se utilizaron los parámetros con los cuales se obtuvo mayor rendimiento en la obtención de pulpa de celulosa; porcentaje de sosa de 20 % y un tiempo de cocción de 90 min.

El balance de materia del proceso de obtención de pulpa de celulosa a partir del pinzote de plátano es el siguiente:

2.11.1. Etapa de limpieza de pinzote

Para la limpieza del pinzote de plátano se partió de 648,29 g, ya que al finalizar todas las etapas de acondicionamiento de la materia prima (limpieza, fermentación en seco, lavado y troceado) se tiene 500 g de pinzote, del cual se obtuvo la pulpa de celulosa.



M_1 (Pinzote de plátano) = 648,29 g

M_2 (Corteza de pinzote de plátano) = 89,76 g

M_3 (Pinzote pelado)

Balance global:

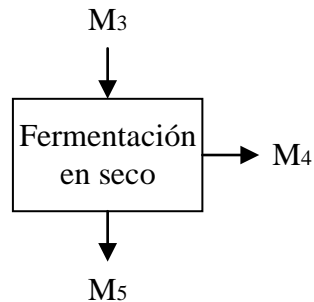
$$M_1 = M_2 + M_3 \quad \text{Ec. (II-24)}$$

$$M_3 = M_1 - M_2 \quad \text{Ec. (II-25)}$$

$M_3 = (648,29 - 89,76) \text{ g}$

$M_3 = 558,53 \text{ g}$

2.11.2. Etapa de fermentación en seco



M_3 (Pinzote pelado) = 558,53 g

M_4 (Agua perdida durante la fermentación)

M_5 (Pinzote fermentado) = 555,12 g

Balance global:

$$M_3 = M_4 + M_5 \quad \text{Ec. (II-26)}$$

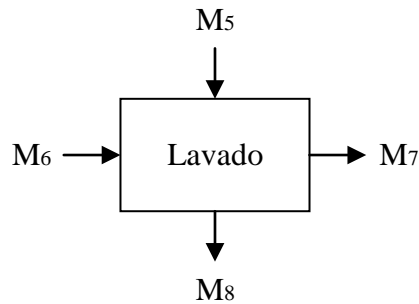
$$M_4 = M_3 - M_5 \quad \text{Ec. (II-27)}$$

$$M_4 = (558,53 - 555,12) \text{ g}$$

$$M_4 = 3,41 \text{ g}$$

2.11.3. Etapa de lavado

Para el lavado se utilizó 2.000 ml de agua, el cual se consideró la densidad de 1 g/ml, por lo tanto, se usó 2.000 g de agua para eliminar las impurezas.



$$M_5 \text{ (Pinzote fermentado)} = 555,12 \text{ g}$$

$$M_6 \text{ (Agua de lavado)} = 2.000 \text{ g}$$

$$M_7 \text{ (Agua residual)}$$

$$M_8 \text{ (Pinzote lavado)} = 546,24 \text{ g}$$

Balance global:

$$M_5 + M_6 = M_7 + M_8 \quad \text{Ec. (II-28)}$$

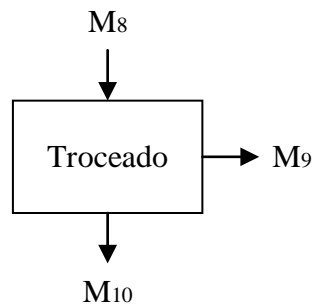
$$M_7 = M_5 + M_6 - M_8 \quad \text{Ec. (II-29)}$$

$$M_7 = (555,12 + 2.000 - 546,24) \text{ g}$$

$$M_7 = 2.008,88 \text{ g}$$

2.11.4. Etapa de troceado

Se procedió a retirar la corteza negra que se formó en el pinzote durante la fermentación en seco, para posteriormente trocearlo en cubitos homogéneos.



M_8 (Pinzote lavado) = 546,24 g

M_9 (Corteza negra)

M_{10} (Pinzote troceado) = 500 g

Balance global:

$$M_8 = M_9 + M_{10} \quad \text{Ec. (II-30)}$$

$$M_9 = M_8 - M_{10} \quad \text{Ec. (II-31)}$$

$$M_9 = (546,24 - 500) \text{ g}$$

$$M_9 = 46,24 \text{ g}$$

2.11.5. Etapa de cocción alcalina

El pinzote troceado presenta una humedad de 92,36 %, en esta etapa se empleó 20 % de hidróxido de sodio (NaOH) en base a la materia prima seca, a continuación, se muestra el cálculo correspondiente:

$$m_{\text{pinzote}} = 500 \text{ g}$$

$$x_{w \text{ pinzote}} = 92,36 \%$$

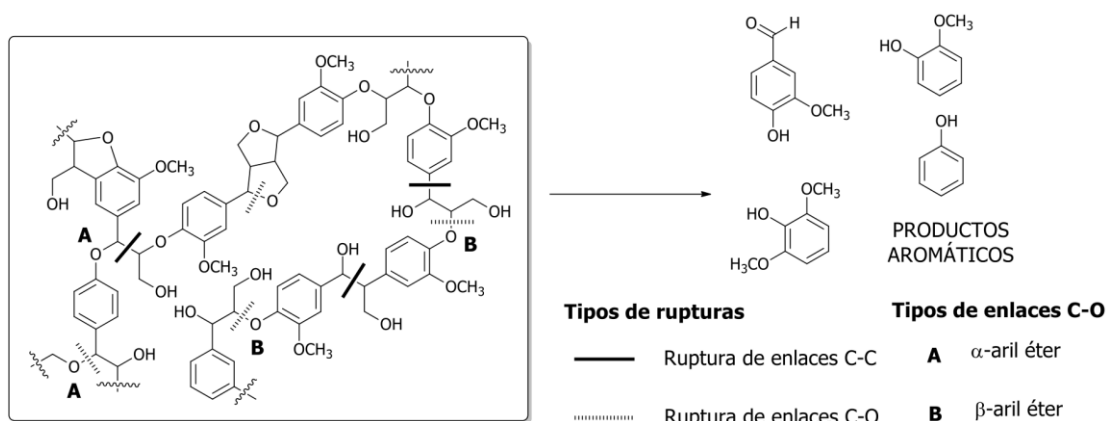
$$m_{\text{NaOH}} = 0.2 * [m_{\text{pinzote}} - (m_{\text{pinzote}} * x_{w \text{ pinzote}})] \quad \text{Ec. (II-32)}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 0.2 * [500\text{g} - (500\text{g} * 0,9236)] = 7,64 \text{ g}$$

“Durante la digestión varias reacciones tienen lugar, incluyendo la ruptura de enlaces entre lignina y los carbohidratos, la despolimerización de la lignina y su recondensación. La despolimerización de lignina mediante el proceso a la sosa se

produce principalmente a través de la ruptura de los enlaces α - y β -aril éter (C-O), primeramente, en las unidades fenólicas y en una fase posterior sobre las unidades no fenólicas. Estas reacciones generan fragmentos con grupos fenólicos solubles en el medio alcalino predominante durante la digestión” (Chávez & Domine , 2013).

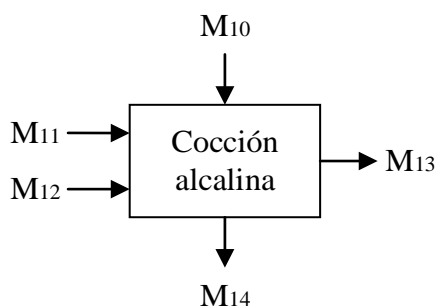
Figura II-15: Principales rupturas de enlaces en la lignina durante su despolimerización y conversión en monómeros de tipo aromático



Fuente: (Chávez & Domine , 2013)

Entre los principales

A continuación, se tiene el balance de materia durante la cocción:



M_{10} (Pinzote troceado) = 500 g

M_{11} (Hidróxido de sodio) = 7,64 g

M_{12} (Agua destilada) = 1.000 g

M_{13} (Agua evaporada)

M_{14} (Pulpa + licor negro) = 1.432,26 g

Balance global:

$$M_{10} + M_{11} + M_{12} = M_{13} + M_{14} \quad \text{Ec. (II-33)}$$

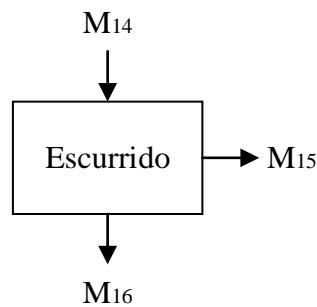
$$M_{13} = M_{10} + M_{11} + M_{12} - M_{14} \quad \text{Ec. (II-34)}$$

$M_{13} = (500 + 7,64 + 1.000 - 1.432,26) \text{ g}$

$M_{13} = 75,38 \text{ g}$

2.11.6. Etapa de escurrido

Se procedió a escurrir la pulpa obtenida utilizando un colador, para así separarla del licor negro, teniendo los siguientes datos:



M_{14} (Pulpa + licor negro) = 1.432,26 g

M_{15} (Licor negro)

M_{16} (Pulpa escurrida) = 130 g

Balance global:

$$M_{14} = M_{15} + M_{16} \quad \text{Ec. (II-35)}$$

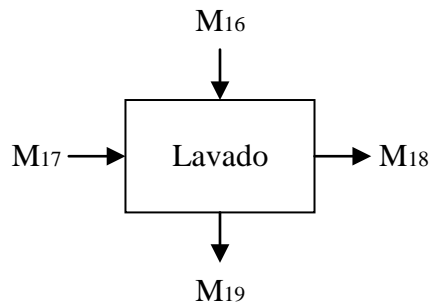
$$M_{15} = M_{14} - M_{16} \quad \text{Ec. (II-36)}$$

$M_{15} = (1.432,26 - 130) \text{ g}$

$M_{15} = 1.302,26 \text{ g}$

2.11.7. Etapa de lavado

Para el lavado de la pulpa se utilizó 5.000 ml de agua, permitiendo eliminar los restos de lignina y solución alcalina, logrando una pulpa con un pH aproximadamente neutro.



$$M_{16} (\text{Pulpa escurrida}) = 130 \text{ g}$$

$$M_{17} (\text{Agua de lavado}) = 5.000 \text{ g}$$

$$M_{18} (\text{Agua residual})$$

$$M_{19} (\text{Pulpa lavada}) = 68,9 \text{ g}$$

Balance global:

$$M_{16} + M_{17} = M_{18} + M_{19} \quad \text{Ec. (II-37)}$$

$$M_{18} = M_{16} + M_{17} - M_{19} \quad \text{Ec. (II-38)}$$

$$M_{18} = (130 + 5.000 - 68,9) \text{ g}$$

$$M_{18} = 5.061,1 \text{ g}$$

2.11.8. Etapa de blanqueado

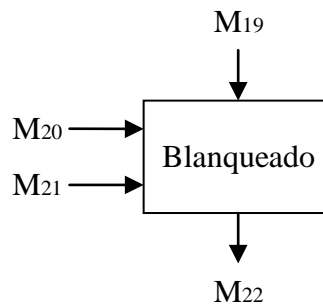
En la etapa del blanqueado se empleó 50 cm³ hipoclorito de sodio (NaClO) para eliminar el contenido de lignina residual evitando así causar daños en la calidad de la fibra, ya que la lignina produce una decoloración marrón en el papel final.

$$V_{\text{NaClO}} = 50 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{\text{NaClO}} = 1,11 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{\text{NaClO}} = \rho_{\text{NaClO}} * V_{\text{NaClO}} \quad \text{Ec. (II-39)}$$

$$m_{\text{NaClO}} = 1,11 \text{ g/cm}^3 * 50 \text{ cm}^3 = 55,5 \text{ g}$$



$$M_{19} (\text{Pulpa lavada}) = 68,9 \text{ g}$$

$$M_{20} (\text{Hipoclorito de sodio}) = 55,5 \text{ g}$$

$$M_{21} (\text{Agua}) = 450 \text{ g}$$

$$M_{22} (\text{Pulpa blanqueada + hipoclorito de sodio})$$

Balance global:

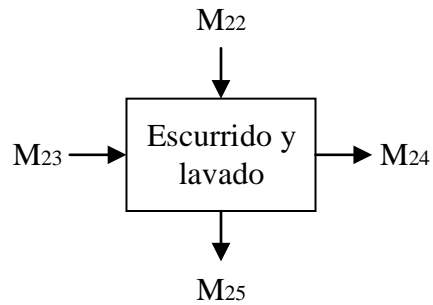
$$M_{19} + M_{20} + M_{21} = M_{22} \quad \text{Ec. (II-40)}$$

$$M_{22} = (68,9 + 55,5 + 450) \text{ g}$$

$$M_{22} = 574,4 \text{ g}$$

2.11.9. Etapa de escurrido y lavado

Una vez escurrida la pulpa se procedió a lavarla, se utilizó 3.000 ml de agua, permitiendo eliminar los restos de NaClO, logrando una pulpa con un pH aproximadamente neutro.



M_{22} (Pulpa blanqueada + hipoclorito de sodio) = 574,4 g

M_{23} (Agua de lavado) = 3.000 g

M_{24} (Agua residual)

M_{25} (Pulpa blanqueada) = 55,33 g

Balance global:

$$M_{22} + M_{23} = M_{24} + M_{25} \quad \text{Ec. (II-41)}$$

$$M_{24} = M_{22} + M_{23} - M_{25} \quad \text{Ec. (II-42)}$$

$$M_{24} = (574,4 + 3.000 - 55,33) \text{ g}$$

$$M_{24} = 3.519,07 \text{ g}$$

Se obtuvo 55,33 g de pulpa blanqueada con una humedad del 80,50 %, entonces el rendimiento del proceso de obtención de pulpa de celulosa con los parámetros óptimos es:

$$\text{Rendimiento del proceso} = \frac{m_{\text{pulpa seca}}}{m_{\text{pinzote seco}}} * 100 \quad \text{Ec. (II-43)}$$

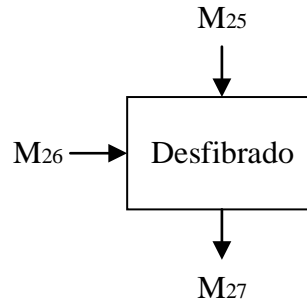
$$\text{Rendimiento del proceso} = \frac{[m_{\text{pulpa}} - (m_{\text{pulpa}} * X_w \text{ pulpa})]}{[m_{\text{pinzote}} - (m_{\text{pinzote}} * X_w \text{ pinzote})]} * 100$$

$$\text{Rendimiento del proceso} = \frac{[55,33 - (55,33 * 0,8050)]}{[500 - (500 * 0,9236)]} * 100$$

$$\text{Rendimiento del proceso} = 28,24 \%$$

2.11.10. Etapa de desfibrado

En esta etapa se utilizó 1.000 ml de agua para el desfibrado de la pulpa de celulosa.



M_{25} (Pulpa blanqueada) = 55,33 g

M_{26} (Agua) = 1.000 g

M_{27} (Pulpa desfibrada + agua)

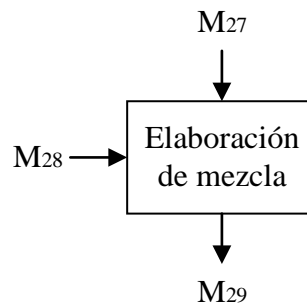
Balance global:

$$M_{25} + M_{26} = M_{27} \quad \text{Ec. (II-44)}$$

$M_{27} = (55,33 + 1.000) \text{ g}$

$M_{27} = 1.055,33 \text{ g}$

2.11.11. Etapa de elaboración de mezcla



M_{27} (Pulpa desfibrada + agua) = 1.055,33 g

M_{28} (Agua) = 2.000 g

M_{29} (Mezcla de pulpa para papel)

Balance global:

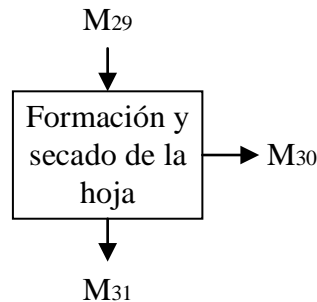
$$M_{27} + M_{28} = M_{29} \quad \text{Ec. (II-45)}$$

$$M_{29} = (1.055,33 + 2.000) \text{ g}$$

$$M_{29} = 3.055,33 \text{ g}$$

2.11.12. Etapa de formación y secado de la hoja

Una vez elaboradas las hojas, se pusieron a secar, obteniendo 11,01 g de papel con una humedad entre 6 a 10 %.



$$M_{29} \text{ (Mezcla de pulpa para papel)} = 3.055,33 \text{ g}$$

$$M_{30} \text{ (Agua + pérdidas)}$$

$$M_{31} \text{ (Hojas de papel)} = 11,01 \text{ g}$$

Balance global:

$$M_{29} = M_{30} + M_{31} \quad \text{Ec. (II-46)}$$

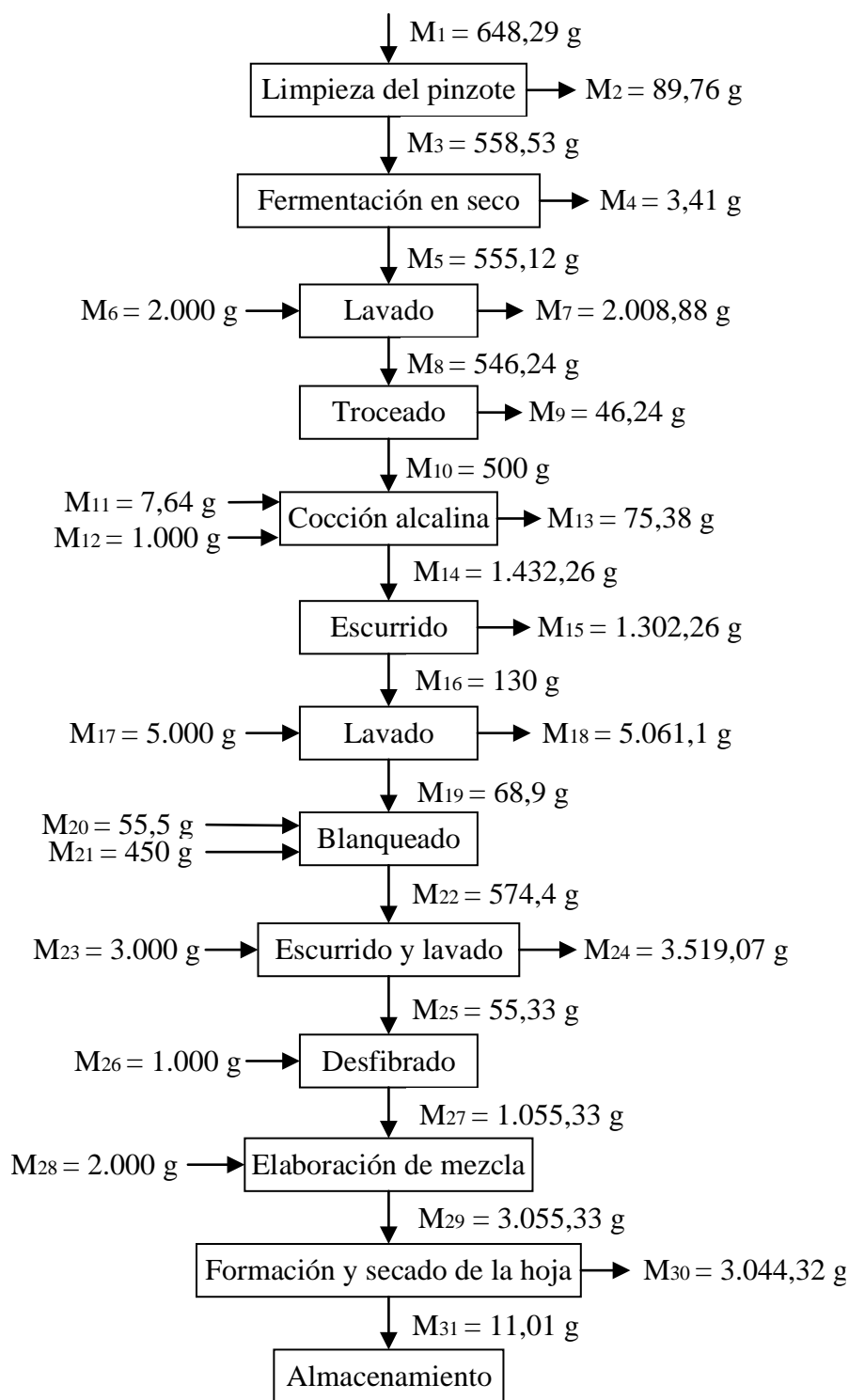
$$M_{30} = M_{29} - M_{31} \quad \text{Ec. (II-47)}$$

$$M_{31} = (3.055,33 - 11,01) \text{ g}$$

$$M_{31} = 3.044,32 \text{ g}$$

A continuación, en la figura II-16 se muestra el resumen del balance de materia realizado con los resultados obtenidos:

Figura II-16: Resumen del balance de materia

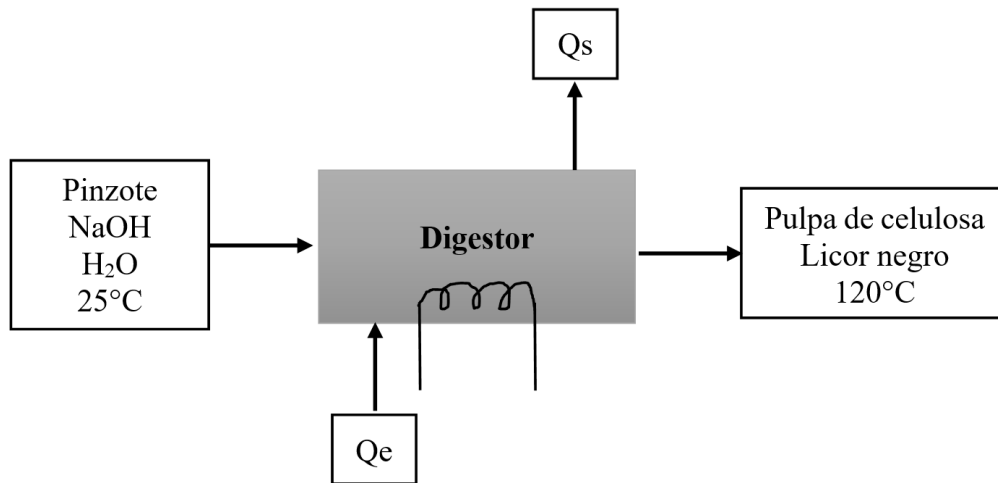


Fuente: Elaboración propia

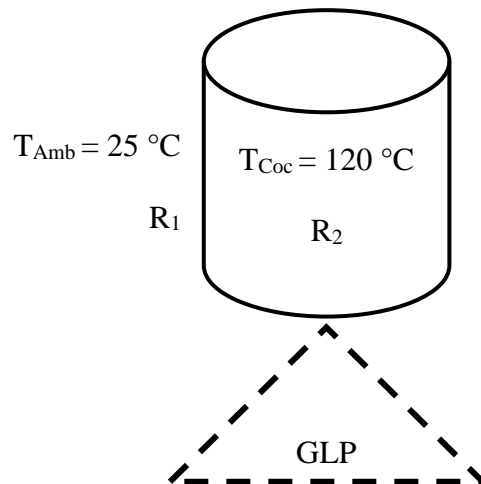
2.12. Balance de energía

2.12.1. Balance de energía del recipiente de cocción

A continuación, se presenta el diagrama de flujo para el balance de energía durante la cocción del pinzote:



Representación gráfica



Cálculo del calor que desprende el sistema

$$Q_s = U * A * \Delta T \quad \text{Ec. (II-48)}$$

Dónde:

Q_s = Calor que desprende el sistema (kJ/h)

U = Coeficiente global de transferencia (W/m^2K)

A = Área de transferencia (m^2)

ΔT = Variación de temperatura (K)

El área de transferencia de calor será la siguiente, considerando el radio $r = 0,095$ m y una altura de $h = 0.09$ m del recipiente metálico.

$$A = 2 * \pi * r * h \quad \text{Ec. (II-49)}$$

$$A = 2 * \pi * 0,095 \text{ m} * 0,09 \text{ m}$$

$$A = 0,0537 \text{ m}^2$$

Se calcula el coeficiente global de transferencia (U)

$$U = \frac{1}{\sum A * R} = \frac{1}{a * R_1 + A * R_2} \quad \text{Ec. (II-50)}$$

Dónde:

R_1 = Resistencia de convección recipiente-aíre

R_2 = Resistencia de conducción mezcla-recipiente

Cálculo de la resistencia por convección:

$$R_1 = \frac{1}{h * A} \quad \text{Ec. (II-51)}$$

Dónde:

h = Coeficiente de convección aíre ($10 W/m^2K$)

A = Área de transferencia (m^2)

$$R_1 = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 * K} * 0,0537 m^2} = 1,86 \frac{K}{W}$$

Se calcula la resistencia por conducción:

$$R_2 = \frac{e}{k * A} \quad \text{Ec. (II-52)}$$

Dónde:

e = Espesor recipiente (4×10^{-3} m)

k = Coeficiente de conducción (20 W/mK)

A = Área de transferencia (m^2)

$$R_2 = \frac{4 \times 10^{-3} \text{ m}}{20 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} * 0,0537 \text{ m}^2} = 3,72 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por tal motivo:

$$U = \frac{1}{\sum A * R} = \frac{1}{(0,0537 \text{ m}^2) * (1,86 + 3,72 \times 10^{-3}) \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 9,992 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Con este valor se calcula el calor que pierde el sistema:

$$Q = U * A * \Delta T$$

$$Q = \left(9,992 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right) * (0,0537 \text{ m}^2) * (393,15 + 298,15) \text{ K}$$

$$Q = 50,97 \text{ W} = 50,97 \frac{\text{J}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 0,05097 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Se halla el calor necesario para alcanzar una temperatura de 120 °C de la mezcla:

$$Q_{\text{mezcla}} = (m * C_p * \Delta T)_{\text{mezcla}} \quad \text{Ec. (II-53)}$$

Donde:

$Q_{\text{mezcla}} = Q_e$ = Calor que entra al sistema

m = Masa de la mezcla (agua + NaOH + pinzote)

C_p = Capacidad calorífica de la mezcla (kJ/kg°C)

ΔT = Variación de temperatura (°C)

Cálculo del C_p del pinzote de plátano

La capacidad calorífica de un vegetal se puede determinar en función del contenido de la humedad presente en la estructura, con el siguiente análisis matemático propuesto por Dickerson:

$$C_p = 1,675 + 2,512 X_w \quad \text{Ec. (11.54)}$$

Donde:

C_p = Calor específico

X_w = Fracción másica de agua

$$C_p = 1,675 + (2,512 * 0,9236)$$

$$C_p = 3,995 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Se determina el C_p de la mezcla:

$$C_{p_{mezcla}} = x_i * C_{p_i} \quad \text{Ec. (II-55)}$$

$$C_{p_{mezcla}} = x_{pinzote} * C_{p_{pinzote}} + x_{agua} * C_{p_{agua}} + x_{NaOH} * C_{p_{NaOH}}$$

$$C_{p_{mezcla}} = (0,332) * \left(3,995 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right) + (0,663) * \left(4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right) + (0,005) * \left(1,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right)$$

$$C_{p_{mezcla}} = 4,109 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Con este valor se calcula el calor que requiere la mezcla para alcanzar 120 °C:

$$Q_{mezcla} = 1,50764 \text{ kg} * 4,109 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (120 - 25)^\circ\text{C}$$

$$Q_{mezcla} = 588,51 \text{ kJ}$$

Hallamos el flujo másico de GLP consumido por la cocina durante la cocción:

$$\dot{m} = \frac{P}{PCI} \quad \text{Ec. (II-56)}$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico de GLP (kg/h)

P = Potencia de la cocina (3 kW)

PCI = Poder calorífico inferior GLP (12,71 kWh/kg)

$$\dot{m} = \frac{3 \text{ kW}}{12,71 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\dot{m} = 0,236 \text{ kg/h}$$

Una vez hallado el flujo másico, se procede a calcular la masa de GLP consumida durante la hora y media de cocción:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad \text{Ec. (II-57)}$$

$$m = \dot{m} * t \quad \text{Ec. (II-58)}$$

Donde:

m = Masa de GLP (kg)

\dot{m} = Flujo másico de GLP (0,236 kg/h)

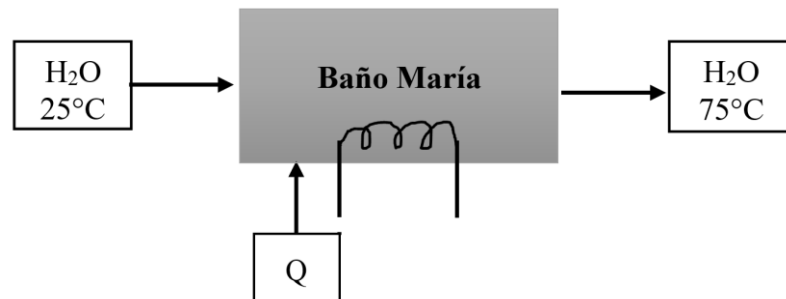
t = Tiempo de cocción (1,5 h)

$$m = 0,236 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1,5 \text{ h}$$

$$m = 0,354 \text{ kg}$$

2.12.2. Balance de energía del agua de lavado

A continuación, se presenta el diagrama de flujo para el balance de energía del agua de lavado:



$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} * C_p * \Delta T \quad \text{Ec. (II-59)}$$

$$Q_{\text{agua}} = (5 \text{ kg}) * \left(4,109 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right) * (75 - 25) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{agua}} = 1.027,25 \text{ kJ}$$

La potencia del calentador del baño María del rotavapor es de 1320 W, el tiempo mínimo requerido es:

$$Q = P * t \quad \text{Ec. (II-60)}$$

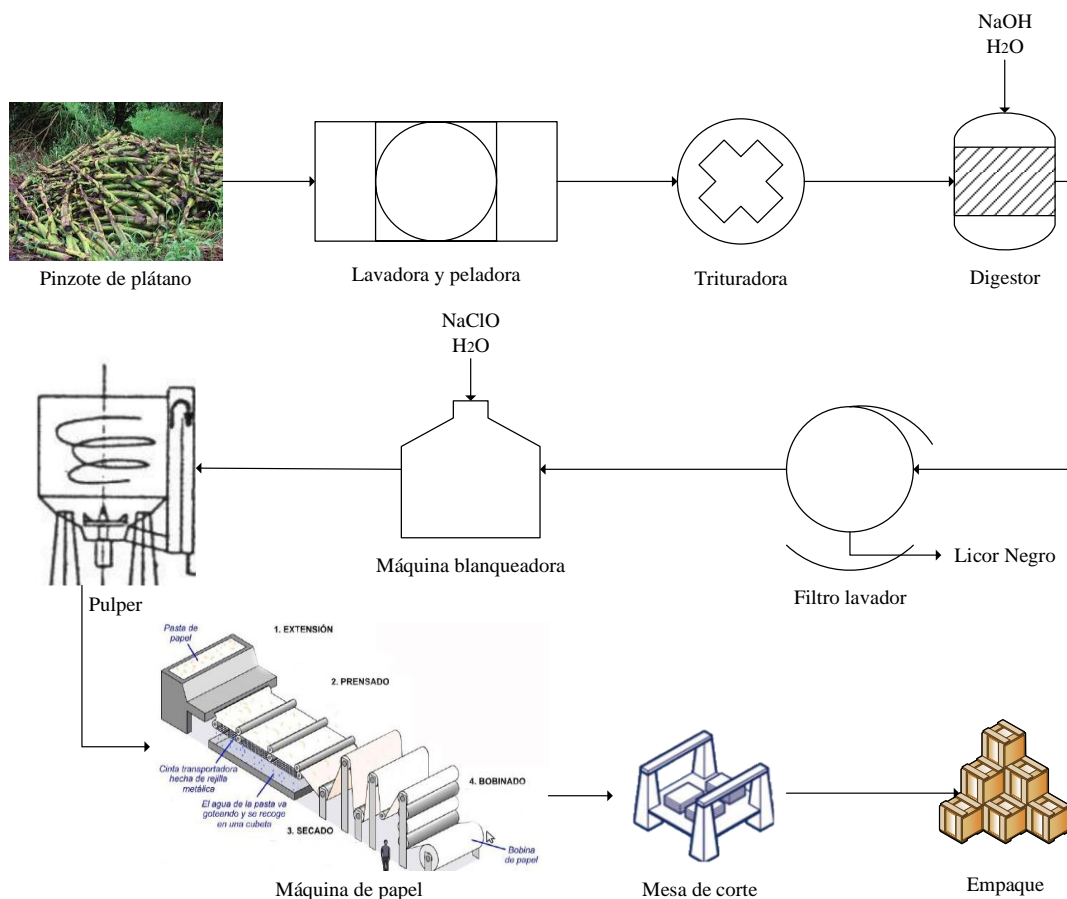
$$t = \frac{Q}{P} = \frac{1.027,25 \text{ kJ}}{1,320 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \quad \text{Ec. (II-61)}$$

$$t = 778,22 \text{ s} * \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}} = 0,22 \text{ h}$$

2.13. Instrumentalización del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel

Una vez ejecutado el proceso de obtención de pulpa de celulosa, se propone una proyección a escala industrial, a continuación, se presenta la instrumentalización del diagrama de flujo, donde se contemplan las principales corrientes y equipos:

Figura II-17: Diagrama de flujo del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de la materia prima

Los parámetros fisicoquímicos del pinzote de plátano fueron determinados mediante las normas TAPPI y ANSI/ASTM, en la tabla III-1 se muestran los resultados:

Tabla III-1: Caracterización fisicoquímica del pinzote de plátano

Parámetro	Norma	Unidad	Resultado
Humedad	TAPPI T 412 om-94	%	92,36
pH	Medición	-	6,8
Densidad	Cálculo	g/cm ³	0,83
Cenizas	TAPPI T 412 om-94	%	18,41
Solubles en alcohol-benceno	TAPPI T 204 m-54	%	4,14
Lignina	TAPPI T 13 os-54	%	12,12
α -celulosa	ANSI/ASTM D1103-60	%	34,59
Holocelulosa	ASTM D-1104	%	54,10

Fuente: Elaboración propia

3.2 Ensayos de obtención de pulpa de celulosa de pinzote de plátano

Se realizaron cuatro ensayos de obtención de pulpa de celulosa con los parámetros propuestos en el diseño factorial, más tres réplicas de cada uno, haciendo un total de 12 experimentos.

Se obtuvo la pulpa de celulosa a porcentaje de sosa de 10 y 20 %, a tiempos de 60 y 90 minutos. A las muestras extraídas se les halló porcentaje de rendimiento, con los resultados se determinó los parámetros óptimos para el proceso.

Donde se considera:

Experimento 1: porcentaje de sosa 10 % y tiempo 60 minutos.

Experimento 2: porcentaje de sosa 20 % y tiempo 60 minutos.

Experimento 3: porcentaje de sosa 10 % y tiempo 90 minutos.

Experimento 4: porcentaje de sosa 20 % y tiempo 90 minutos.

3.2.1 Rendimiento

Las obtenciones de pulpa de celulosa se realizaron a partir de 100 gramos de pinzote de plátano, los resultados de porcentaje de rendimiento se muestran en la tabla:

Tabla III-2: Resultados de rendimiento en base seca de las muestras de pulpa de celulosa

N°	Parámetros de obtención		Rendimiento en base seca (%)			Promedio
	Porcentaje de sosa (%)	Tiempo (min)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	
1	10	60	23,51	23,79	22,45	23,25
2	20	60	25,88	22,92	23,26	24,02
3	10	90	25,04	25,58	27,18	25,93
4	20	90	27,48	28,39	28,86	28,24

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la pulpa de celulosa obtenida aplicando los parámetros del experimento 4 (porcentaje de sosa de 20 % y tiempo de 90 min) es la que presentó mayor porcentaje de rendimiento (28,24%) en comparación al resto de los experimentos.

El experimento que reportó el menor porcentaje de rendimiento fue el N° 1, que tuvo 23,25 %, por otra parte, se demostró que a porcentaje de sosa de 20 % el porcentaje de rendimiento en la obtención es mayor, a porcentaje de sosa de 10% el rendimiento del proceso disminuye.

3.3. Análisis estadístico del diseño experimental

Para el tratamiento estadístico de los datos del diseño factorial, se utilizó el programa SPSS STATISTICS 26 (Statistical Package for the Social Sciences).

En la Tabla III-3, se presenta los datos obtenidos de la parte experimental.

Tabla III-3: Datos de la parte experimental

N°	Matriz de experimentos		Plan de experimentación		Respuesta
	A	B	Porcentaje de sosa (%)	Tiempo (min)	Rendimiento
1	-1	-1	10	60	23,51
2	+1	-1	20	60	25,88
3	-1	+1	10	90	25,04
4	+1	+1	20	90	27,48
5	-1	-1	10	60	23,79
6	+1	-1	20	60	22,92
7	-1	+1	10	90	25,58
8	+1	+1	20	90	28,39
9	-1	-1	10	60	22,45
10	+1	-1	20	60	23,26
11	-1	+1	10	90	27,18
12	+1	+1	20	90	28,86

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

3.3.1. Análisis de Varianza Univariante

Se realiza un Análisis de Varianza Univariante, para poder determinar la influencia de los factores porcentaje de sosa, y tiempo, verificando si todos los factores y sus combinaciones son significativos respecto a la variable respuesta rendimiento de pulpa de celulosa según la tabla III-3. Los factores inter-sujetos se muestran en la tabla III-4 con la codificación de cada nivel.

Tabla III-4: Factores inter-sujetos

N		
Sosa	-1	6
	1	6
Tiempo	-1	6
	1	6

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

Donde N es el número de datos.

Entre mayor sea el número de datos es mucho mejor para que la respuesta estadística sea confiable. En este caso en particular para cada factor (porcentaje de sosa y tiempo) se tiene 6 en su estado mínimo y 6 en su estado máximo, en caso que N sea menor a 4 la respuesta estadística no sería confiable.

La Tabla III-5 muestra las pruebas de efectos inter-sujetos realizadas para determinar variables significativas.

Tabla III-5: Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Rendimiento

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	44,670 ^a	3	14,890	12,270	,002
Intersección	7718,570	1	7718,570	6360,628	,000
Sosa	7,115	1	7,115	5,863	,042
Tiempo	35,777	1	35,777	29,482	,001
Sosa * Tiempo	1,779	1	1,779	1,466	,261
Error	9,708	8	1,213		
Total	7772,948	12			
Total corregido	54,378	11			

a. R al cuadrado = ,821 (R al cuadrado ajustada = ,755)

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

El análisis de la varianza reparte la variabilidad de la respuesta rendimiento en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental, los efectos principales porcentaje de sosa y tiempo fueron altamente significativos para esta variable respuesta, puesto que tienen colas de significación menores a 0,05.

3.3.2. Determinación del Modelo Matemático

Para determinar el modelo matemático se realiza una regresión con todas las variables significativas; porcentaje de sosa, y tiempo y como variable dependiente el rendimiento de pulpa de celulosa que se muestran en la tabla III-6.

Tabla III-6: Variables para la regresión

N°	Porcentaje de sosa	Tiempo	Rendimiento
1	-1	-1	23,51
2	+1	-1	25,88
3	-1	+1	25,04
4	+1	+1	27,48
5	-1	-1	23,79
6	+1	-1	22,92
7	-1	+1	25,58
8	+1	+1	28,39
9	-1	-1	22,45
10	+1	-1	23,26
11	-1	+1	27,18
12	+1	+1	28,86

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

En la Tabla III-7 y Tabla III-8, se muestra un resumen del modelo matemático y del análisis Anova para el rendimiento de pulpa de celulosa donde el exponente hace referencia a las variables predictoras: (Constante), Tiempo, Sosa.

Tabla III-7: Resumen del modelo matemático

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,888 ^a	,789	,742	1,12973

a. Predictores: (Constante), Tiempo, Sosa

b. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

El análisis de varianza de Anova en la tabla III-8 muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto.

Tabla III-8: Resultados del análisis Anova

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	42,891	2	21,446	16,803	,001 ^b
	Residuo	11,487	9	1,276		
	Total	54,378	11			

a. Variable dependiente: Rendimiento

b. Predictores: (Constante), Tiempo, Sosa

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

En la Tabla III-9 se muestran los coeficientes para el modelo matemático del rendimiento de la pulpa de celulosa.

Tabla III-9: Coeficientes del modelo matemático

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	25,362	,326		77,767	,000
	Sosa	,770	,326	,362	2,361	,043
	Tiempo	1,727	,326	,811	5,294	,000

a. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración propia SPSS 26

Según los coeficientes indicados en la Tabla III-9, el modelo matemático para la obtención de pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano, responde a:

$$Y = 25.362 + 0.770 * X_1 + 1.727 * X_2$$

Donde:

X_1 = Porcentaje de sosa (%)

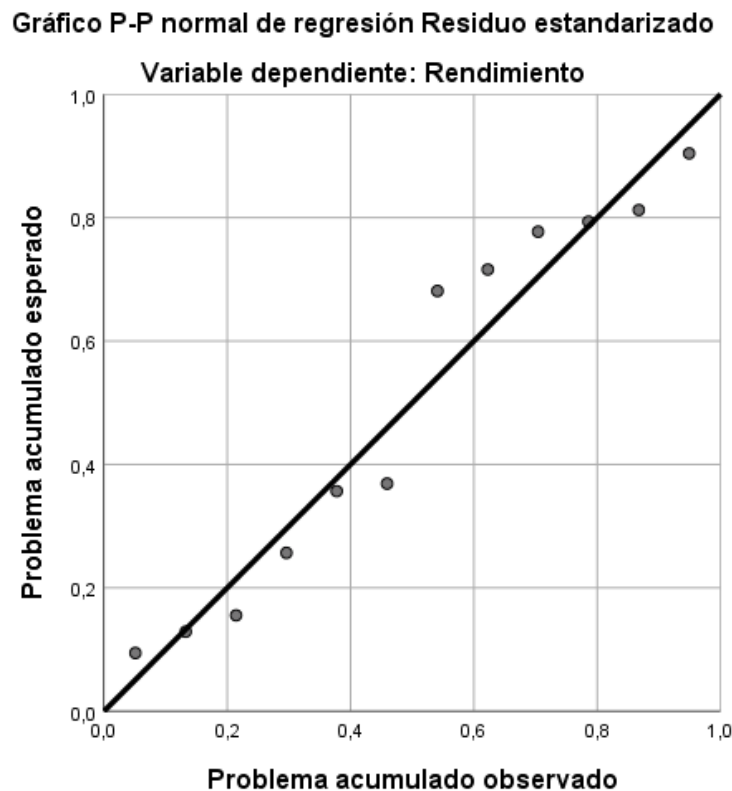
X_2 = Tiempo (min)

Y = Rendimiento (%) de pulpa de celulosa.

Cada una de las variables introducidas y el rendimiento están relacionada con la ecuación.

En la figura III-1 se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis Anova no muestra gran significancia el desajuste, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura III-1: Modelo lineal



Fuente: Elaboración propia SPSS 26

Según el modelo lineal; se obtiene un nuevo rendimiento, recibe el nombre de rendimiento ajustado, el que a continuación se gráfica junto al rendimiento observado que fue obtenido de cada experimento, para poder verificar el ajuste de la ecuación al modelo matemático.

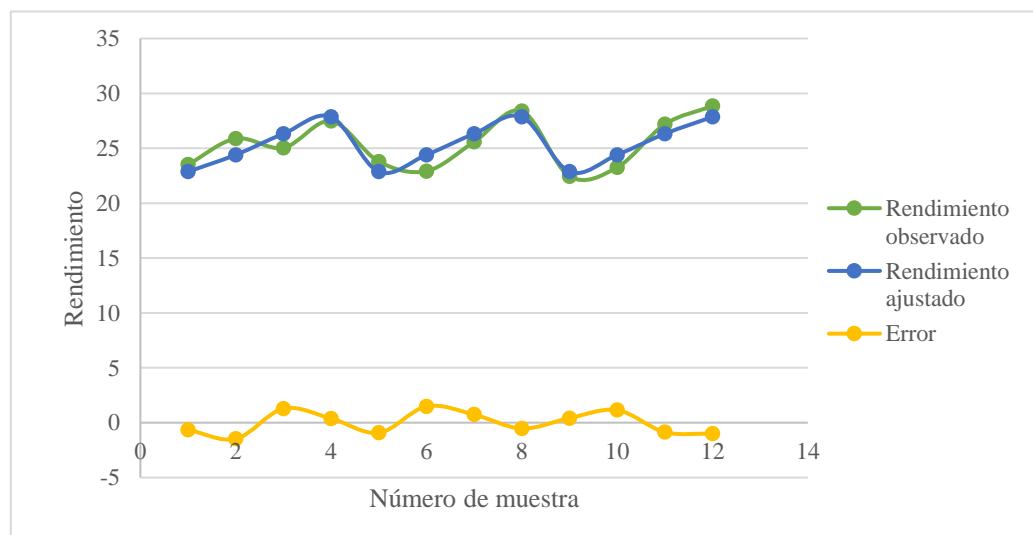
Tabla III-10: Resultados del volumen ajustado y el error

Rendimiento observado (%)	Rendimiento ajustado (%)	Error
18,74	22,87	-0,24
25,88	24,41	-1,86
25,04	26,32	0,89
27,48	27,86	0,76
17,85	22,87	0,65
22,92	24,41	1,10
25,58	26,32	0,35
28,39	27,86	-0,15
18,92	22,87	-0,42
23,26	24,41	0,76
27,18	26,32	-1,25
28,86	27,86	-0,62

Fuente: Elaboración propia

En la figura III-2 se puede observar la gráfica del rendimiento observado, el rendimiento ajustado y el error, donde se puede apreciar que valores entre el valor observado y el valor ajustado no varían drásticamente, por lo que se puede decir que el modelo matemático escogido es el correcto.

Figura III-2: Rendimiento observado, ajustado y error



Fuente: Elaboración propia

3.4. Caracterización del producto: Pulpa de celulosa

3.4.1. Caracterización fisicoquímica

Los parámetros fisicoquímicos de la pulpa de celulosa fueron determinados mediante las normas TAPPI, la muestra analizada fue la obtenida en el experimento 4 (20 % de sosa y 90 minutos), del cual se obtuvo mayor rendimiento.

3.4.2. Humedad

Fue determinado mediante la norma TAPPI T 412 om-94. El valor de humedad obtenido en la pulpa de celulosa fue de 80,50 %.

3.4.3. Cenizas

Fue determinado mediante la norma TAPPI T 211 m-59. El valor de ceniza obtenido en la pulpa de celulosa fue de 1,36 %, se puede observar que el residuo mineral que acompaña a la pulpa es bajo.

3.4.4. Alfa, Beta y Gamma celulosa

Fue determinado mediante la norma TAPPI T 203 os-61. El valor de α -celulosa obtenido en la pulpa de celulosa fue de 70,54 %, de forma general esto indica una celulosa no degradada de alto peso molecular, es decir cantidad de celulosa pura presente en la muestra y su cantidad da una referencia a propiedades como la capacidad a no degradarse por envejecimiento y conservar su resistencia, se puede observar un valor alto, por ende, la pulpa de celulosa obtenida presenta buenas características respecto al valor de α -celulosa.

El valor obtenido de β -celulosa fue de 5,29 %, es la celulosa impura.

El valor obtenido de γ -celulosa fue de 24,17 %, consiste principalmente en hemicelulosas, es decir cantidad de celulosa impura presente en la muestra.

3.4.5. Número Kappa y porcentaje de lignina

El valor obtenido de número Kappa obtenido en la pulpa de celulosa fue de 34,10 aceptable para obtener un papel tipo bond, el valor observado indica que hubo una

deslignificación eficiente durante el proceso de cocción del pinzote de plátano. El resultado de porcentaje de lignina fue de 4,43 %, se puede observar un valor bajo.

3.4.6. Propiedades fisicoquímicas de la pulpa de celulosa

En la tabla III-11 se muestra el resumen de los resultados obtenidos mediante la aplicación de las normas TAPPI.

Tabla III-11: Caracterización fisicoquímica de la pulpa de celulosa

Parámetro	Norma	Unidad	Resultado
Humedad	TAPPI T 412 om-94	%	80,50
Cenizas	TAPPI T 211 m-59	%	1,36
α -celulosa	TAPPI T 203 os-61	%	70,54
β -celulosa	TAPPI T 203 os-61	%	5,29
γ -celulosa	TAPPI T 203 os-61	%	24,17
Número Kappa	TAPPI T 236 cm-85	-	34,10
Lignina	TAPPI T 236 cm-85	%	4,43

Fuente: Elaboración propia

3.5. Gramaje del papel

En la tabla III-12 se muestra el valor de gramaje del papel tipo artesanal que se elaboró con la pulpa obtenida en el proceso.

Tabla III-12: Gramaje del papel

Parámetro	Norma	Unidad	Resultado
Gramaje	NB ISO 536	g/m ²	65,65

Fuente: Elaboración propia

3.6. Resultados del balance de materia y energía

A continuación, se presenta un resumen del balance de materia y energía:

Tabla III-13: Resultados del balance de materia

Corriente	Definición	Gramos (g)
M ₁	Pinzote de plátano	648,29
M ₂	Corteza de pinzote de plátano	89,76
M ₃	Pinzote pelado	558,53

Corriente	Definición	Gramos (g)
M ₄	Agua perdida durante la fermentación	3,41
M ₅	Pinzote fermentado	555,12
M ₆	Agua de lavado	2.000
M ₇	Agua residual	2.008,88
M ₈	Pinzote lavado	546,24
M ₉	Corteza negra	46,24
M ₁₀	Pinzote troceado	500
M ₁₁	Hidróxido de sodio	7,64
M ₁₂	Agua destilada	1.000
M ₁₃	Agua evaporada	75,38
M ₁₄	Pulpa + licor negro	1.432,26
M ₁₅	Licor negro	1.302,26
M ₁₆	Pulpa escurrida	130
M ₁₇	Agua de lavado	5.000
M ₁₈	Agua residual	5.061,1
M ₁₉	Pulpa lavada	68,9
M ₂₀	Hipoclorito de sodio	55,5
M ₂₁	Agua	450
M ₂₂	Pulpa blanqueada + hipoclorito de sodio	574,4
M ₂₃	Agua de lavado	3.000
M ₂₄	Agua residual	3.519,07
M ₂₅	Pulpa blanqueada	55,33
M ₂₆	Agua	1.000
M ₂₇	Pulpa desfibrada + agua	1.055,33
M ₂₈	Agua	2.000
M ₂₉	Mezcla de pulpa para papel	3.055,33
M ₃₀	Agua + pérdidas	3.044,32
M ₃₁	Hojas de papel	11,01

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-14: Resumen del balance de energía

Corriente	Q _{pérdidas} (kJ/s)	Q _{mezcla} (kJ)	Q _{agua} (kJ)
	0,05097	588,51	1.027,25

Fuente: Elaboración propia

3.7. Análisis de Costos

3.7.1. Costo del Estudio

Para determinar el presupuesto de investigación se realiza la evaluación de costos directos, que se realizan durante la elaboración de todo el proyecto. Las siguientes tablas muestran los detalles de los costos indirectos.

Tabla III-15: Detalle de costos de materia prima y reactivos

Insumos	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Pinzote de plátano	10	kg	0	0
Hidróxido de sodio	100	g	0,03	3
Agua destilada	15	l	4	60
Hipoclorito de sodio	1	l	5	5
SUBTOTAL				68

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-16: Detalle de costos de materiales

Insumos	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Olla a presión	1	pieza	100	100
Licudora	1	pieza	140	140
Cedazo + tablas	1	pieza	100	100
Filtro	0,75	m	60	45
Papel filtro	1	pliego	5	5
Colador	1	pieza	5	5
Cuchillo	1	pieza	10	10
Balde	2	pieza	7,5	15
Jarra 1,5 l	1	pieza	7	7
Tupper 330 ml	12	pieza	2,5	30
SUBTOTAL				457

Fuente: Elaboración propia

El resto de los materiales necesarios para la realización del estudio, fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla III-17: Detalle de costos de reactivos para la realización de los análisis de materia prima y producto

Reactivos	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Alcohol 96°	70	ml	0,012	0,84
Benceno	150	ml	0,5	75
Ácido sulfúrico 96% p/p	40	ml	0,4	16
Ácido acético 98 % p/p	60	ml	0,35	21
Hidróxido de sodio	25	g	0,03	0,75
Clorito de sodio	5	g	0,4	2
Permanganato de potasio	1	g	0,28	0,28
Yoduro de potasio	10	g	1	10
Tiosulfato de sodio	10	g	0,1	1
SUBTOTAL				126,87

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-18: Detalle de costos material de apoyo

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario (Bs.)	Valor total (Bs.)
Internet	Horas	150	3	450
Pasajes	-	100	1	100
Impresión	Hojas	900	0,5	450
Anillado	-	6	7	42
Empastado	-	3	50	150
Mano de obra	Horas	200	30	6.000
Subtotal				7.192

Fuente: Elaboración propia

El costo fijo asociado al servicio de energía eléctrica fue: 0,6 Bs/ kWh.

Tabla III-19: Detalle de costos de energía de los equipos utilizados

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Costo total (Bs.)
Estufa	2	72	144	86,4
Mufla	3,2	6	19,2	11,52
Baño María	1,32	6	7,92	0,19
Agitador magnético	0,63	6,5	4,095	2,46
Licuadora	0,5	1	0,5	0,3
Bomba de vacío	0,18	2	0,36	0,22
Molino de discos	0,248	0,25	0,062	0,04
Molino de martillos	0,7	0,25	0,175	0,11
Tamizador	0,12	0,25	0,03	0,02
Subtotal				101,26

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-20: Detalle de costos totales del estudio

Descripción	Costo total (Bs.)
Costos materia prima y reactivos	68
Costos de materiales	457
Costos de reactivos para realización de análisis	126,87
Costos material apoyo	7.192
Costos de energía de los equipos utilizados	101,26
Imprevistos	794,51
Total	8.739,64

Fuente: Elaboración Propia

El costo total de la investigación es de **8.739,64** Bs.

3.7.2. Costo de producción.

A partir de los balances de materia y energía y el gasto energético de los equipos utilizados puede estimarse el costo de producción para la obtención de pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano.

Los costos fijos asociados a los servicios básicos fueron; energía eléctrica 0,6 Bs/ kWh, agua 0,7 Bs/m³ y gas licuado de petróleo 2,25 Bs/kg.

De los 648,29 g de pinzote de plátano procesado se obtiene 55,33 g de pulpa de celulosa.

Las siguientes tablas estiman el costo de producción:

Tabla III-21: Detalle de costos de materia prima

Insumo	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Pinzote de plátano	648,29	g	0	0
Hidróxido de sodio	7,64	g	0,03	0,23
Agua destilada	1	l	4	4
Hipoclorito de sodio	0,05	l	5	0,25
Subtotal				4,48

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-22: Detalle de costos de energía de los equipos utilizados

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Costo total (Bs.)
Baño María	1,32	0,22	0,29	0,17

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-23: Detalle del costo de consumo de agua

Agua	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Lavado	0,01	m ³	0,7	0,007
Blanqueado	0,00045	m ³	0,7	0,000315
Mezcla	0,003	m ³	0,7	0,0021
Subtotal				0,0094

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-24: Detalle del costo del consumo de gas licuado de petróleo

Gas licuado de petróleo	Cantidad	Unidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Cocción alcalina	0,354	kg	2,25	0,796

Fuente: Elaboración propia

El costo total de producción es la suma de los costos de materia prima, consumo energético de los equipos, consumo de agua y gas licuado de petróleo.

$$\text{Costo total} = (4,48 + 0,17 + 0,0094 + 0,796) \text{ Bs.}$$

$$\text{Costo total} = \mathbf{5,46 \text{ Bs.}}$$

Para la producción de 55,33 g de pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano se tiene un costo aproximado de 5,46 Bs.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- ✚ En el presente trabajo de investigación se logró obtener pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir de pinzote de plátano (*Musa balbisiana*) cultivado en el trópico boliviano, por el proceso a la sosa, el cual se obtuvo un rendimiento del 28,24 % en base seca, es decir, por cada 100 g de pinzote de plátano seco se obtiene 28,24 g de pulpa seca.
- ✚ Las condiciones óptimas para la obtención de pulpa de celulosa fueron: Porcentaje de sosa de 20 % en base a materia prima seca y tiempo de cocción de 90 min con el cual se obtuvo un rendimiento del 28,24 %, este valor es superior al obtenido por Turrado et al. (2009), que presentó un rendimiento del 22,8 %, teniendo como condiciones óptimas 16 % de porcentaje de sosa y 60 minutos de tiempo de cocción.
- ✚ Los parámetros fisicoquímicos del pinzote de plátano se determinaron experimentalmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo de la UAJMS, fueron los siguientes:

Características fisicoquímicas del pinzote de plátano		
Parámetro	Unidad	Resultado
Humedad	%	92,36
pH	-	6,8
Densidad	g/cm ³	0,83
Cenizas	%	18,41
Solubles en alcohol-benceno	%	4,14
Lignina	%	12,12
α -celulosa	%	34,59
Holocelulosa	%	54,10

- ✚ Los parámetros fisicoquímicos del producto obtenido, pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano, se determinaron experimentalmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UAJMS, fueron los siguientes:

Características fisicoquímicas de la pulpa de celulosa		
Parámetro	Unidad	Resultado
Humedad	%	80,50
Cenizas	%	1,36
α -celulosa	%	70,54
β -celulosa	%	5,29
γ -celulosa	%	24,17
Número Kappa	-	34,10
Lignina	%	4,43

- ✚ Quihue (2014) obtuvo pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano, a continuación, se muestra una tabla comparativa de las características fisicoquímicas entre la pulpa que obtuvo y la pulpa obtenida en el presente trabajo:

Tabla comparativa de pulpa de celulosa		
Componentes	Pulpa (Muñoz, 2022)	Pulpa (Quihue, 2014)
α -celulosa	70,54 %	23,27 – 28,6 %
β -celulosa	5,29 %	69,61 – 74,74 %
γ -celulosa	24,17 %	1,79 – 1,99 %
Número Kappa	34,10	32,02
Lignina	4,43 %	4,16 %

De acuerdo a la tabla comparativa se puede observar que la pulpa obtenida en el presente trabajo es de mejor calidad, ya que presenta mayor porcentaje de α -celulosa, 70,54%, la misma es considerada como la celulosa más pura, la cantidad muestra su capacidad a no degradarse por envejecimiento y conservar su resistencia. En cuanto al número Kappa y lignina residual se observan valores similares.

- ✚ El costo de producción para la obtención experimental (a escala laboratorio) de pulpa de celulosa a partir de pinzote de plátano (*Musa balbisiana*) fue de 5,46 Bs, para obtener 55,33 g de pulpa de celulosa por 500 g de pinzote procesado.

4.2. Recomendaciones

- ✚ Se recomienda continuar con la investigación, estudiando distintos procesos de obtención de celulosa, con la finalidad de obtener mejores resultados, tanto en rendimiento como en características del producto.
- ✚ En base a los datos obtenidos se recomienda la elaboración del estudio de diseño técnico de preinversión para la industria papelera en la región del trópico boliviano.
- ✚ Al existir gran variedad de materiales fibrosos no maderables, se pueden emplear las mismas en el proceso de obtención de pulpa de celulosa, con el fin de tener distintas alternativas a la hora de fabricar papel.
- ✚ Debido a las características que pueden tener los residuos de la industria papelera, se recomienda investigar el proceso de recuperación de reactivos a partir del licor negro, con el fin de eliminar este agente contaminante y aprovechar los reactivos recuperados, como ser el hidróxido de sodio, para reutilizarlo en la obtención de pulpa de celulosa y de esta manera reducir costos de reactivos.