

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Actualmente en la industria papelera en el mundo existe una búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas de producción más eficientes y menos contaminantes debido a que la materia prima principal utilizada es la madera. Como consecuencia de esta actividad se induce a la deforestación que afecta al planeta entero por alterar significativamente la huella de carbono y la pérdida de la biodiversidad (Nuñez, 2024).

El 90% de las fábricas integradas de papel produce pulpa de celulosa proveniente de la fibra de madera de los árboles. El impacto ambiental que trae la utilización de madera cada vez es mayor ya que cada año se talan millones de árboles destinados a la industria de celulosa y papel (Martin, 2013).

Tabla 1: Principales países productores de pulpa de celulosa de fibras maderables a nivel mundial

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
China	26.100.402	30.608.402	36.924.402	43.040.402
Estados Unidos	50.809.984	49.753.682	48.457.000	46.561.000
Brasil	19.692.000	20.953.000	22.505.000	24.969.000

Fuente: (FAO, 2025)

Tabla 2: Principales países productores de pulpa de celulosa de fibras maderables a nivel Latinoamérica

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
Brasil	19.692.000	20.953.000	22.505.000	24.969.000
Chile	5.292.700	5.205.000	4.979.000	4.655.000
Argentina	660.000	620.000	609.000	611.000

Fuente: (FAO, 2025)

Para la manufactura de pulpa de celulosa la fuente principal más utilizada es la fibra de madera por su disponibilidad económica, su proporción relativamente alta de celulosa y sus características técnicas confiables. No obstante, hoy en día existe una tendencia hacia la obtención de celulosa a partir de fuentes no maderables para reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente (Muñoz, 2017).

Existen dos tipos de fibras no maderables, las que provienen de plantas cultivadas exclusivamente para la producción de pulpa de celulosa y las que provienen de una actividad agroindustrial como residuos agrícolas que contienen fibra para emplearlos en la fabricación de pulpa de celulosa (Calero, 2019).

Las fuentes no maderables pueden obtenerse de diversos residuos agrícolas, estas han sido utilizadas en cantidades relativamente bajas para la producción de pulpa de celulosa y aportan una pequeña parte de la materia prima suministrada para la fabricación de pulpa de celulosa. Sin embargo, en muchos países se utilizan ampliamente como ser China, Estados Unidos y Brasil (FAO, 2010).

La región que ha invertido más tiempo y recursos para hacer pulpa de celulosa a partir de fibras no maderables son Asia y el Pacífico (Cortés, 2018).

Tabla 3: Principales países productores de pulpa de celulosa a partir de fibras no maderables a nivel mundial

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
China	5.877.000	5.253.000	5.533.000	5.580.000
Estados Unidos	146.000	149.347	108.000	96.000
Brasil	63.000	63.300	63.000	59.000

Fuente: (FAO, 2025)

Tabla 4: Principales países productores de pulpa de celulosa a partir de fibras no maderables a nivel Latinoamérica

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
Brasil	63.000	63.300	63.000	59.000
Argentina	130.000	113.000	89.000	89.100
México	17.000	16.700	16.500	16.100

Fuente: (FAO, 2025)

Dentro de las importaciones en Bolivia, de pulpa de celulosa, en 2022 la tonelada de pulpa de celulosa a partir de fibras maderables tuvo un valor de 1.140 dólares a nivel internacional, siendo un costo para Bolivia (OEC, 2023).

Tabla 5: Principales importaciones nacionales de pulpa de celulosa en Bolivia

País proveedor	Cantidad en toneladas	Dólares
China	1.412,28	1.610.000
Brasil	394,74	450.000
Estados Unidos	222,81	254.000

Fuente: (OEC, 2023)

La cáscara de maní es un residuo agrícola que se origina al retirar las semillas de la vaina de maní, ésta constituye entre el 21 – 29 % del peso de la vaina entera. La cáscara de maní es generada en grandes cantidades y su composición es alta en fibras de celulosa (Jaramillo, 2019).

La producción mundial de maní ronda los 45,5 millones de toneladas. China ha conseguido posicionarse como el primer productor de maní aprovechando sus ventajas de condiciones de suelos, rendimiento y mano de obra. Asimismo, destacan África y Argentina (SISA, 2020).

Tabla 6: Principales países productores de maní a nivel mundial

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
China	17.572.798	18.046.465	18.357.437	18.380.500
India	6.727.180	9.952.020	10.244.080	10.134.990
Nigeria	4.346.335	4.230.560	4.227.520	4.284.000

Fuente: (FAO, 2025)

Tabla 7: Principales países productores de maní a nivel Latinoamérica

País	Cantidad en toneladas por año			
	2019	2020	2021	2022
Argentina	1.337.229	1.285.431	1.267.242	1.346.166
Brasil	580.573	651.126	794.666	848.194
México	81.413	101.251	102.778,84	111.152

Fuente: (FAO, 2025)

En 2021 la producción de maní en Bolivia superó las 26.000 toneladas, siendo los departamentos con mayor cosecha Tarija con el 52%, seguido por Santa Cruz con el 23% y Chuquisaca con el 19% (IBCE, 2021).

Los grandes volúmenes de desechos que genera la industria del maní, son aproximadamente el 30% de la producción, esto se ha transformado en un problema por las bacterias y hongos que viven de forma natural en la cáscara por la gran cantidad de espacios vacíos que facilitan que los microorganismos nativos entren en contacto con el sustrato y el ambiente (Olmedo, 2012).

La cáscara de maní es un recurso abundante y accesible para la fabricación de productos a partir de materiales fibrosos no madereros, siendo importante en el desarrollo económico por darles un valor agregado y promover la conservación de los recursos forestales (Jimenez, da Silva, Umlandt, Gatani, & Medina, 2020).

Estudios han demostrado que la cáscara de maní (*Arachis hypogaea* L.) contiene una cantidad significativa de celulosa, entre el 35 y el 45%, convirtiéndolo en un material fibroso con potencial para diversos usos (Jimenez, da Silva, Umlandt, Gatani, & Medina, 2020).

En la Universidad de Guayaquil se realizó un proyecto de investigación, con el título de “Obtención de papel a partir de la cáscara de maní (*Arachis hypogaea*)” (Espinoza & Leon, 2017), donde se caracterizó la materia prima reportando una favorable composición de 44,36% de celulosa y 25,67% de lignina. Además, se caracterizó la pulpa de celulosa obtenida del proceso de cocción alcalino con un Número de Kappa de 30,74% y un porcentaje de alfa-celulosa de 92,85%, dando un rendimiento de pulpa de celulosa del 45,1%.

El residuo de la cáscara de maní no tiene un uso económicamente rentable en la industria manisera, esto se convierte en un inconveniente por el extraordinario volumen que ocupa y los problemas asociados al acopio o al ser inadecuadamente dispuestos.

La cáscara de maní presenta propiedades favorables para su explotación, por lo que se prosiguió a investigar su aprovechamiento como materia prima para producir pulpa de celulosa, un producto de mayor valor agregado.

En Tarija, en el año 1978, a través de la ex CODETAR (Corporación de Desarrollo de Tarija), se suscribió un contrato para la instalación de una fábrica de Papel en la comunidad de Sidras, Cantón Emborozú, provincia Arce y se conformó la IPTASA (Industria Papelera de Tarija Sociedad Anónima) con capitales chinos, la CODETAR e inversores privados. El 14 de abril de 1986 mediante el Decreto Supremo N° 21227, la IPTASA, mediante un crédito argentino, adquirió materia prima, equipos, insumos y repuestos. Debido a la falta de maquinaria, producción y materia prima de mala calidad y deficiente administración, la IPTASA fue cerrada (Torrez, 2016).

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener pulpa de celulosa a escala laboratorio a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) cultivado en el departamento de Tarija.

Objetivos específicos

- Caracterizar la materia prima.
- Realizar el diseño experimental para la obtención de pulpa de celulosa a escala laboratorio.
- Caracterizar la pulpa de celulosa obtenida mediante un análisis fisicoquímico y ensayo de resistencia.
- Determinar el rendimiento del proceso experimental.
- Determinar los costos.

JUSTIFICACIÓN

Justificación tecnológica

El presente proyecto de investigación tiene el propósito de aprovechar los residuos agrícolas de la cáscara de maní generados en el departamento de Tarija para obtener pulpa de celulosa a partir del contenido de fibra celulósica que posee.

Se busca demostrar una alternativa tecnológica de producción a escala laboratorio que sea sostenible, rentable y que posteriormente pueda utilizarse como materia prima en la industria de celulosa y papel, contribuyendo a la reducción de este residuo.

Justificación económica

La producción de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní es una oportunidad económica para el sector agrícola dedicado a la producción de maní por ser un subproducto generado en grandes cantidades. Al aprovechar las cáscaras se le da un valor agregado y los productores pueden venderlo como materia prima para la fabricación de pulpa de celulosa.

Justificación social

Socialmente se busca aportar con un ingreso extra al sector agrícola dedicado al cultivo de maní a partir del valor agregado que se le puede proporcionar al residuo de las cáscaras y generar conciencia de que existe otra forma de utilizar las cáscaras como en la producción de pulpa de celulosa a partir de fuentes no maderables.

Justificación ambiental

Se busca reducir el impacto ambiental que trae la industria de celulosa y papel que utiliza como materia prima pulpa de celulosa fabricada a partir de fuentes maderables. Se pretende emplear una alternativa de producción de pulpa de celulosa menos contaminante, promoviendo la conservación de los bosques con la disminución de la deforestación que afecta al planeta entero.

Además, al aprovechar la fibra de celulosa que contiene la cáscara de maní, disminuye el desarrollo de microorganismos en el medio ambiente y en el suelo, siendo una alternativa de producción más amigable y respetuosa con el medio ambiente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1 El maní

El maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) es una planta herbácea de la familia Fabaceae, originaria de América del Sur, la cual crece durante el verano, germina en primavera y madura en otoño del mismo año. Tiene un tallo ascendente de 30-80 cm de altura, sus hojas son color verde de forma ovaladas a elípticas y sus flores son color amarillo dorado brillante. El fruto es del tipo geocarpo, ya que este fruto se desarrolla dentro de la tierra, es inflada, generalmente de 2,5 x 1,3 cm. Cada vaina posee de una a cuatro semillas cubiertas por un tegumento color rojizo oscuro de 5-10 mm de diámetro.

El maní bayo es un tipo de maní con semilla de color claro, entre beige y café claro. Su cultivo y cosecha tiene un ciclo de 100 a 150 días después de la siembra, según las condiciones de crecimiento, requiriendo un clima cálido y algo seco. (Duke, 1983).

Figura I-1: El maní



Fuente: (Gonzalez, 2016)

1.2 Taxonomía del maní

De acuerdo con la clasificación taxonómica, el maní se clasifica de la siguiente forma:

Tabla I-1: Taxonomía del maní

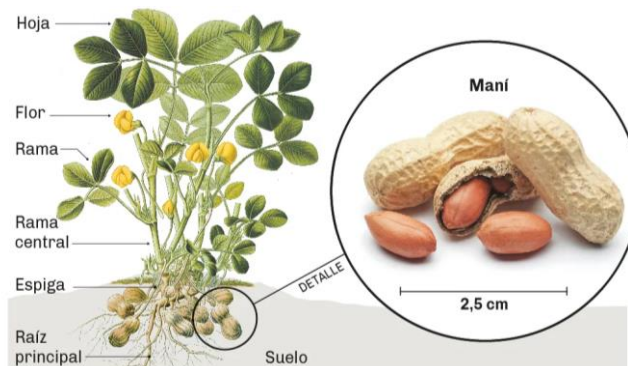
Reino	Vegetal
División	Tracheophytae
Sub división	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sub clase	Dicotyledoneae
Grado evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de órdenes	Corolinos
Orden	Rosales
Familia	Leguminosae
Sub familia	Papilionoideae
Nombre científico	<i>Arachis hypogaea</i> L.
Nombre común	Maní

Fuente: (Acosta, 2025)

1.3 Morfología del maní

1.3.1 La planta

Es una planta herbácea que desarrolla sus frutos bajo tierra. Cuenta con dos sistemas radiculares, uno bastante profundo que le da resistencia a la planta durante la sequía y el otro con numerosas raíces superficiales (Torres, 2020).

Figura I-2: Planta de maní

Fuente: (Torres, 2020)

1.3.2 La raíz

La raíz se conforma por una raíz pivotante central que produce varias raíces secundarias y terciarias nacientes a diversas alturas del pivote central (Torres, 2020).

1.3.3 El tallo

El tallo es circular con entrenudos bien marcados, es de color verde con ramificaciones desde la base, desarrollando raíces cuando dichas ramas tocan el suelo. El tallo crece hasta 70 cm de altura, la mitad superior produce hojas mientras que la mitad inferior produce flores amarillas y vainas (Torres, 2020).

1.3.4 Las hojas

Las hojas son alternas y compuestas, son foliolos ovalados o ligeramente puntiagudos dispuestas a ambos lados del tallo. Las hojas miden hasta 6 cm de largo y cada foliolo mide de 1 a 7 cm de largo y de 1 a 3 cm de ancho (Torres, 2020).

1.3.5 Las flores

Se dividen en cinco partes, son tubulares, color amarillo con vetas rojizas. Crecen sobre la mitad inferior de la planta y produce pétalos grandes, su color puede variar desde el blanco hasta el naranja intenso, normalmente son color amarillo. El pedúnculo que sostiene las flores se prolonga hasta alcanzar una longitud de 5 a 15 cm (Torres, 2020).

1.3.6 El fruto

El fruto es una vaina indehiscente, regularmente contiene de 2 a 4 semillas. El fruto está rodeado por la cáscara, siendo del 20 al 30% del peso total (Torres, 2020).

1.3.7 La semilla

Son sutilmente redondas a ovalo alargadas, con hilo puntiagudo, tiene una testa más o menos gruesa, su peso puede oscilar entre 0,2 - 2 g, puede llegar a medir 2 cm de largo y 1 cm de ancho. El 3% del peso de la semilla corresponde al tegumento (Torres, 2020).

1.3.8 La cáscara

La cáscara de maní es el envoltorio exterior de la semilla que se desprende en el proceso de pelado o preparación del maní para consumo. Presenta una superficie externa rugosa, delgada y frágil; por debajo de ella se ubica una malla de estructura más fibrosa que consiste en una red interna fibrilar de estructura ramificada que aporta rigidez a la cáscara. Esta estructura en red está adherida a la capa interna que es de aspecto más poroso, de composición más compacta y de un color más claro que la capa externa.

El tamaño de la cáscara es según la cantidad de granos que pueda alojar, varía entre 17 – 50 mm, y posee un espesor promedio de 0,75 mm. Debido a su geometría cóncava, la cáscara permite que una gran cantidad de aire se encuentre en su interior (Jiménez, Silva, Umlandt, Gatani, & Medina, 2019).

Figura I-3: Cáscara de maní



Fuente: (González, 2014)

La cáscara de maní es un subproducto lignocelulósico ya que contiene principalmente celulosa, lignina y hemicelulosa. En menores proporciones contiene extractivos, humedad, proteínas crudas y cenizas.

En la siguiente tabla se muestra la composición química de la cáscara de maní.

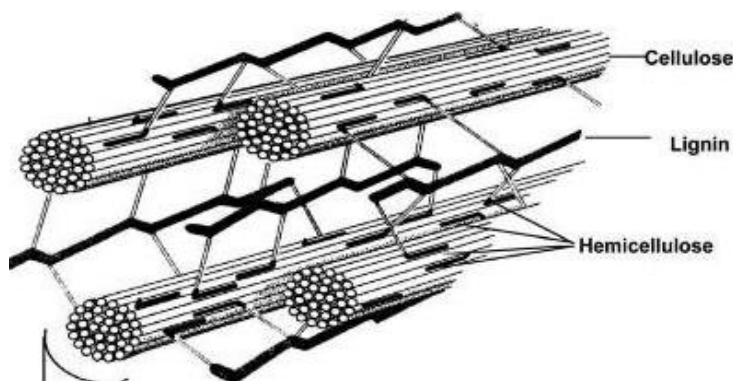
Tabla I-2: Composición química en la cáscara de maní

Contenido	Cantidad (%)
Celulosa	35-45
Lignina	27-33
Hemicelulosa	23-30
Extractivos	11-14
Humedad	8-10
Proteínas crudas	6-11
Cenizas	2-4

Fuente: (Gatani, 2010)

1.4 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es el material vegetal no comestible más abundante del planeta, está formada por tres componentes principales: la celulosa y la hemicelulosa, los cuales predominan en la región de la pared celular, y la lignina, la cual se distribuye por toda la estructura del tejido. Estos componentes se entrelazan para formar una estructura compleja y estable en la pared celular de las células vegetales, su proporción varía según el tejido vegetal de donde provenga. La biomasa lignocelulósica es considerada una de las fuentes renovables más prometedoras de todo el mundo por estar ampliamente disponible a un costo relativamente bajo (Sampedro, 2012).

Figura I-4: Estructura de la biomasa lignocelulósica

Fuente: (Ortiz, 2019)

1.4.1 Celulosa

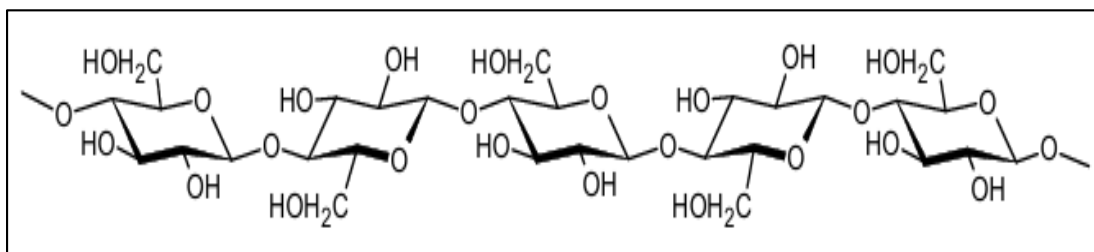
La celulosa es un carbohidrato, de todos los compuestos naturales del carbono, la celulosa parece ser el más abundante. Dentro de los carbohidratos, se clasifica como un polisacárido. En nuestro planeta se forma en grandes cantidades y es el principal componente de la pared celular de los tejidos vegetales.

Su composición es de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, muchas determinaciones individuales de peso molecular y muchos otros datos experimentales indican que el valor de n es muy grande, estando comprendido entre 1000 y 5000, dependiendo de cómo se aisló, trató y purificó la celulosa. El número de veces “ n ” indica la cantidad de veces que la unidad $C_6H_{10}O_5$ se repite, a menudo se le llama grado de polimerización (Libby, 1967).

Sus moléculas forman cadenas lineales, cuando varias cadenas se encuentran una al lado de otra se construye una red estable de cadenas interconectadas por enlaces de hidrógeno. El componente celulósico se encuentra protegido del ataque enzimático y químico, embebido en una matriz formada por hemicelulosa y lignina.

Cuando se separa la celulosa del resto de componentes no celulósicos, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, son flexibles y químicamente estables. Esta resistencia unida al alto grado de organización de la celulosa, aporta resistencia química y mecánica, siendo la causa de que sea el material estructural de las fibras vegetales (Teschke & Demers, 2012).

Figura I-5: Estructura de la celulosa

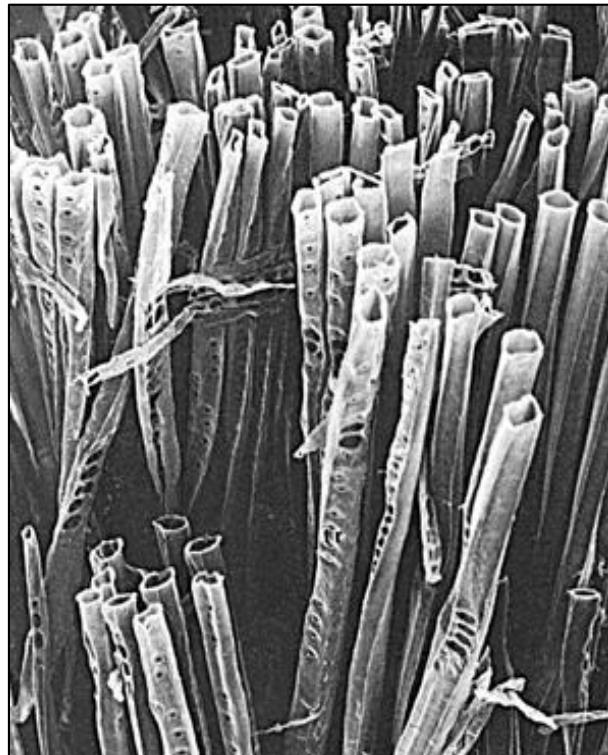


Fuente: (Sampedro, 2012)

1.4.1.1 Propiedades de hinchamiento

Merecen mencionarse las propiedades de hinchamiento de las fibras de celulosa, estas propiedades aparecen aun cuando la celulosa sólo se remoje en agua, y se vuelven muy significativas cuando las fibras se tratan con soluciones del 17 al 18% de hidróxido de sodio. Esta propiedad fue descubierta por Jhon Mercer en 1844. En general, la reactividad de una fibra de celulosa mejora a medida que aumenta el grado de hinchamiento en el medio de reacción, permitiendo un mejor acceso a los componentes de la fibra (Libby, 1967).

Figura I-6: Fibras de celulosa



Fuente: (Jiménez, 2022)

1.4.2 Hemicelulosa

Es un polisacárido que actúa como soporte para las microfibrillas de celulosa. Debido a sus ramificaciones, es capaz de unirse a otras moléculas formando una pared rígida que mantiene unidas la celulosa con la lignina.

En el proceso de elaboración de pulpa de celulosa las hemicelulosas menos resistentes se separan en la digestión y las más resistentes se retienen para aportar con propiedades a la pulpa de celulosa como aumentar su plasticidad, flexibilidad y capacidad de enlace, entre otros. Como consecuencia se produce una mejora de la densidad de la pasta celulósica y de las propiedades físico-mecánicas que dependen del área de enlace interfibras (Gómez, 2014).

La suma total de la celulosa y hemicelulosa rinde un producto fibroso llamado holocelulosa. Los métodos comerciales de obtención de pulpas eliminan también algunas de las hemicelulosas menos resistentes, de modo que la holocelulosa no puede ser obtenida por una operación de producción de pulpas celulósicas (Libby, 1967).

1.4.3 Lignina

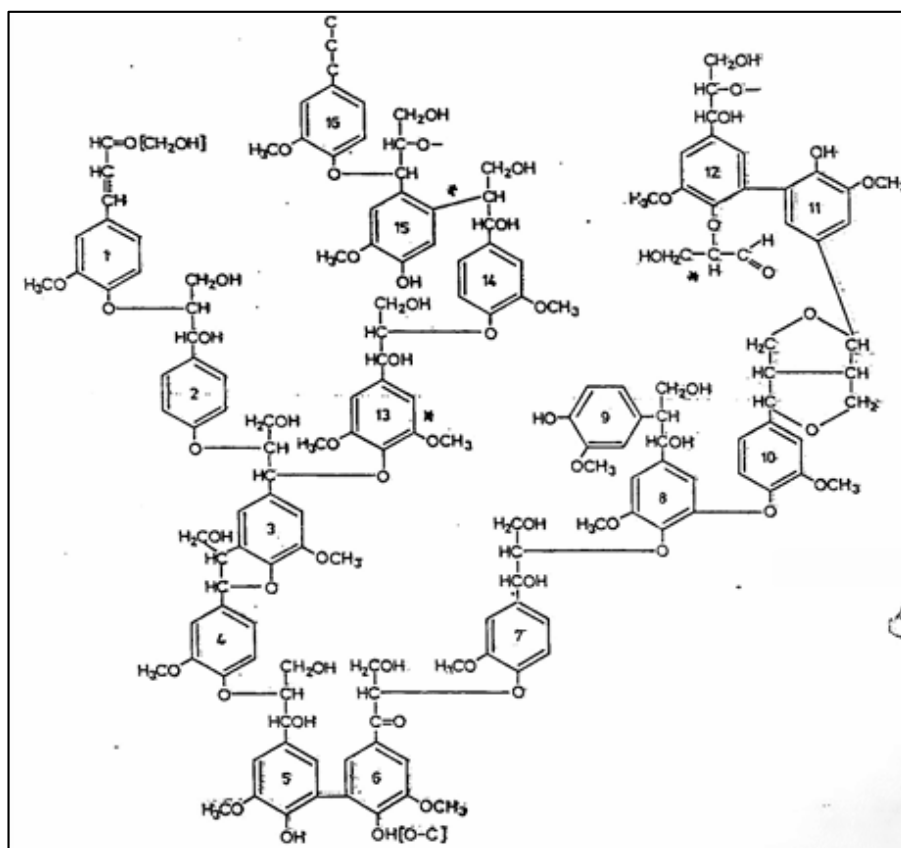
Si de la madera se eliminan celulosas, hemicelulosas, azúcares, almidones, proteínas, aminoácidos, sales inorgánicas, grasas, ceras, resinas, taninos, terpenos, flavanoides u otros extractos, el 20 a 30% de material remanente es la lignina.

Es un polímero de naturaleza fenilpropanoide, es el segundo compuesto más abundante de la naturaleza situándose en las paredes de las fibras. Es un complejo aromático de estructura química irregular por no tener a sus elementos estructurales enlazados de forma ordenada, y su principal función es proporcionar rigidez estructural.

Este material dificulta el proceso de obtención de pastas celulósicas ya que se encuentra incrustado en la celulosa, inhibe la absorción de agua y el hinchamiento de la fibra, dificultando el posterior refinado. Sin embargo, al ser un elemento termoplástico, la elevación de temperatura produce su ablandamiento debilitando los enlaces interfibras (Gómez, 2014).

La lignina puede ser separada de los componentes con los que se encuentra asociada disolviéndola o disolviendo de preferencia los compuestos diferentes de ella. La mayoría de las ligninas aisladas son polvos amorfos de color café, con propiedades físicas que varían según el método para prepararlas (Libby, 1967).

Figura I-7: Estructura de la lignina



Fuente: (González, 2012)

1.5 Pulpa de celulosa

La pulpa de celulosa está compuesta principalmente por celulosa, es el producto resultante de procesar la madera u otra fuente vegetal para extraer y separar las fibras de celulosa. Debido a su fuerte estructura fibrosa, es la materia prima básica utilizada en la industria de celulosa y papel (Gómez, 2014).

Según la maquinaria y acciones utilizadas, los materiales vegetales se muelen, cuecen, digieren, desfibran, deslignifican o refinan para convertirse en pulpas celulósicas. El color de la pulpa es un atributo físico de gran importancia comercial. La facilidad con que se altere el blanqueo depende del tipo y grado de acción química suministrada en la obtención de la pulpa. Para producir pulpas de alta calidad para disolver, se deben usar métodos de blanqueo que completen la deslignificación (Libby, 1967).

Figura I-8: Tonalidades de blanqueo de pulpa celulósica



Fuente: (Sousa, Pinto, & Machado, 2023)

1.6 Procesos de obtención de pulpa de celulosa

En el proceso de obtención de pulpa de celulosa, la materia prima que contiene la celulosa se debe separar en sus fibras individuales. La separación se realiza mediante destrucción o debilitamiento de los enlaces que las mantienen unidas a los compuestos con los que se encuentra asociado, esto no debe modificar las características iniciales de la celulosa, ya que el producto puede ser alterado. La eficiencia de la separación depende de la cantidad de lignina remanente y del estado de las fibras después del proceso de pulpado, ambos influyen en las características de calidad de la pulpa de celulosa (Sampedro, 2012).

Las vías principales para obtener pulpa de celulosa son mediante proceso mecánico, semiquímico o químico. La diferencia depende de cómo se define el debilitamiento físico y químico de los enlaces interfibras (Tejedor, 2012).

1.6.1 Proceso mecánico

Se basa en la aplicación de un esfuerzo mecánico de compresión y cizallamiento para separar las fibras de celulosa. La desintegración se realiza sin el uso de productos químicos y los constituyentes químicos del material fibroso son esencialmente inalterados, a excepción de algunos solubles en agua.

Este proceso se favorece por las altas temperaturas y la presencia de vapor de agua que debilitan los enlaces interfibras que, con la presión ejercida, liberan celulosa y hemicelulosa mediante solubilización dejando la lignina como residuo insoluble.

Requiere un elevado consumo de energía y la capacidad de enlace fibra – fibra es baja. Se caracteriza por su alto rendimiento, entre un 85 y 95 %. Un inconveniente es que la lignina remanente es susceptible a oxidarse generando un color amarillento típico de los diarios. Los principales usos son en la fabricación de papel para periódicos e impresión (Tejedor, 2012).

1.6.2 Proceso semiquímico

Complementa las etapas de tratamientos químicos y mecánicos para la obtención de pulpa de celulosa reuniendo ventajas de ambos procesos. Las fibras obtenidas tienen buena rigidez y moldeabilidad con rendimientos de hasta 80% (Ocampo, 2011).

1.6.3 Proceso químico

Consiste en degradar y disolver la lignina dejando la mayor parte de celulosa y hemicelulosa en su forma intacta en las fibras celulósicas. La muestra se trata con reactivos químicos que disuelven la lignina dejando como residuos insolubles la celulosa y la hemicelulosa. Como resultado, la mayor parte de la lignina se remueve evitando que el papel final se vuelva amarillo por oxidación (Tejedor, 2012).

Este tratamiento se aplica en el proceso de cocción con productos químicos adecuados dispuestos en una solución acuosa y sometido a altas temperaturas y presiones. Se caracteriza por tener un rendimiento total en pulpa relativamente bajo, en comparación con el proceso mecánico, entre un 40 y 55 %. Entre sus ventajas, la pulpa de celulosa resultante es más resistente ya que las fibras quedan intactas, además, es más fácil de blanquear y menos propensa a perder sus cualidades en el tiempo (Valdivieso, 2020).

Los subprocesos principales son el proceso Kraft, a la sosa y al sulfito, se clasifican según los compuestos químicos que emplean en la cocción (Jiménez, 2006).

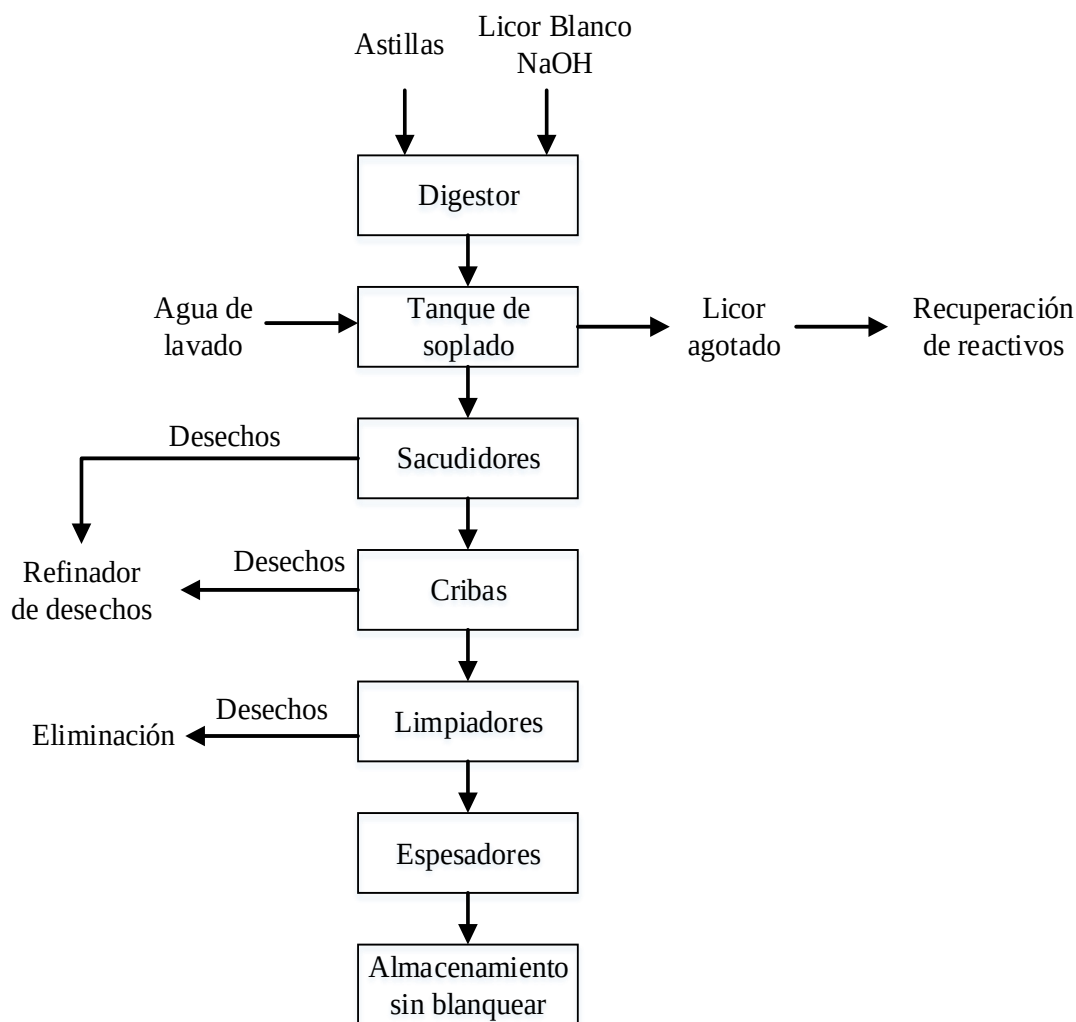
1.6.3.1 Proceso a la sosa

Proporciona una pulpa blanqueada de fibra corta con papeles de calidad, el reactivo empleado es hidróxido de sodio. La temperatura que se aplica oscila entre 150 y 180°C con presiones de 500 a 1000 KPa. La cocción de la materia vegetal en la sosa cáustica se realiza en un tiempo de 2 a 4 horas.

Fue el primer procedimiento químico desarrollado para obtener pulpa de celulosa a partir de la madera en el año 1865, consiste en mezclar una solución de hidróxido de sodio con la materia vegetal para someterla a una digestión a temperaturas superiores a 150°C para disolver la lignina y separar las fibras de celulosa de los demás componentes. La lignina sufre reacciones de naturaleza hidrolítica dando lugar a compuestos solubles en álcali.

Entre sus principales ventajas destacan la facilidad en la preparación del licor blanco y la pulpa de celulosa obtenida es de gran volumen con un color claro, lo que le confiere características como receptividad de impresión. Este proceso da lugar a una fibra de gran resistencia y los residuos que se eliminan en el lavado de la pulpa obtenida son grasas y resinas. El rendimiento expresado en porcentaje de pulpa por cantidad de materia prima empleada se sitúa entre 45-50% (Jiménez, 2006).

Figura I-9: Diagrama de flujo de proceso a la sosa



Fuente: (González, 2014)

1.6.3.2 Proceso Kraft

El desarrollo de este proceso se atribuye a C.F. Dahl en Danzig, Alemania, en 1879, quien tomando como punto de partida el procedimiento a la sosa, introdujo sulfato de sodio en el licor de cocción. La conversión en sulfuro de sodio produjo una mejora drástica en la cinética de cocción y las propiedades de la pulpa. Esto tuvo importancia en 1930 con el desarrollo del blanqueo por dióxido de cloro y la implantación de químicos para recuperación de reactivos.

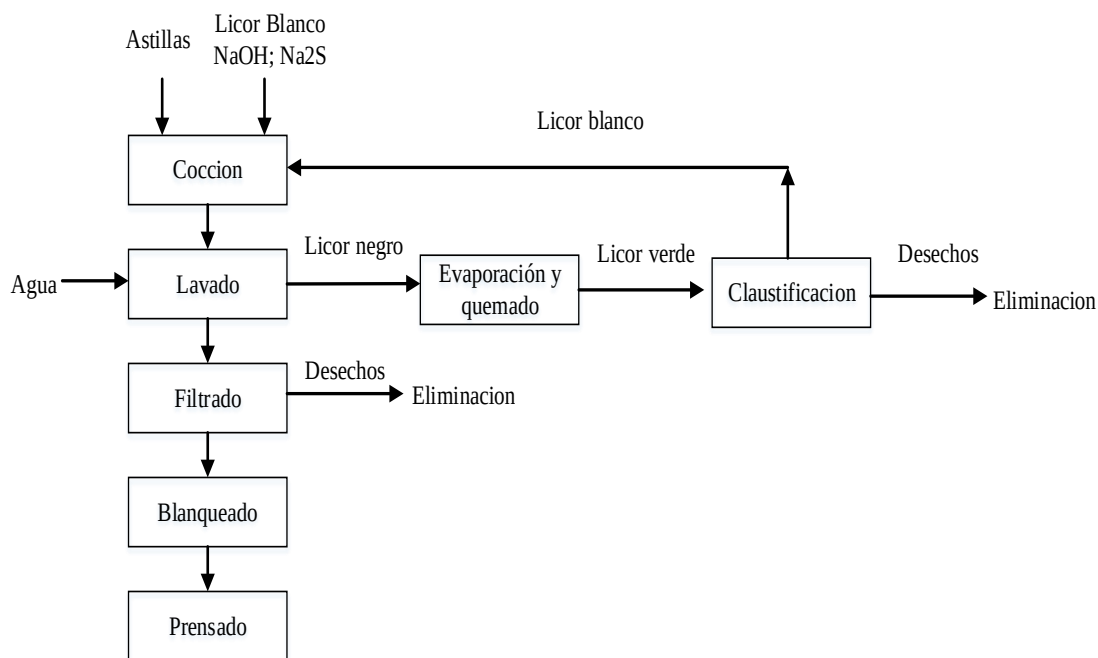
Es el proceso más utilizado a nivel industrial por representar el 80% de la producción mundial de pulpa de celulosa, debido a la obtención de pulpa más resistente, fuerte, con altos niveles de blancura y con ciclos cortos de cocción. Entre sus desventajas están el alto costo de inversión, la polución por mal olor, el bajo rendimiento de pulpado y el alto costo de blanqueo debido a las pulpas oscuras producidas.

La obtención de pulpa comienza con la mezcla de cocción que es hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S). La temperatura máxima de cocción es $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un tiempo de 1 a 2 horas para completar la reacción y separar la lignina de la celulosa. Después de la digestión, el contenido se descarga en un tanque de soplado donde el cambio brusco de presión desintegra los chips de madera en fibras. La pulpa proveniente del tanque es sometida a una operación de lavado y se envía al blanqueado.

El proceso kraft se diferencia por la forma de eliminar mayor lignina, dejando más celulosa y produciendo un papel más resistente. Una característica ventajosa de este proceso es la recuperación de los reactivos de cocción.

Este procedimiento es muy eficaz, si bien presenta la desventaja de los malos olores producidos por la emisión de tioles y sulfuros, la pulpa que se obtiene es muy blanca.

La pulpa de celulosa se caracteriza por tener un bajo porcentaje de lignina y por su resistencia, las fibras de celulosa quedan intactas, son fáciles de blanquear y poco propensas a perder sus cualidades en el tiempo. El rendimiento del proceso es bajo, entre 40 y 60%. Las variables que más influyen este proceso son la concentración de álcali activo y la temperatura de cocción de 150 a $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Goyen, 2000).

Figura I-10: Diagrama de flujo de proceso kraft

Fuente: (Cruz, 2009)

1.6.3.3 Proceso al sulfito

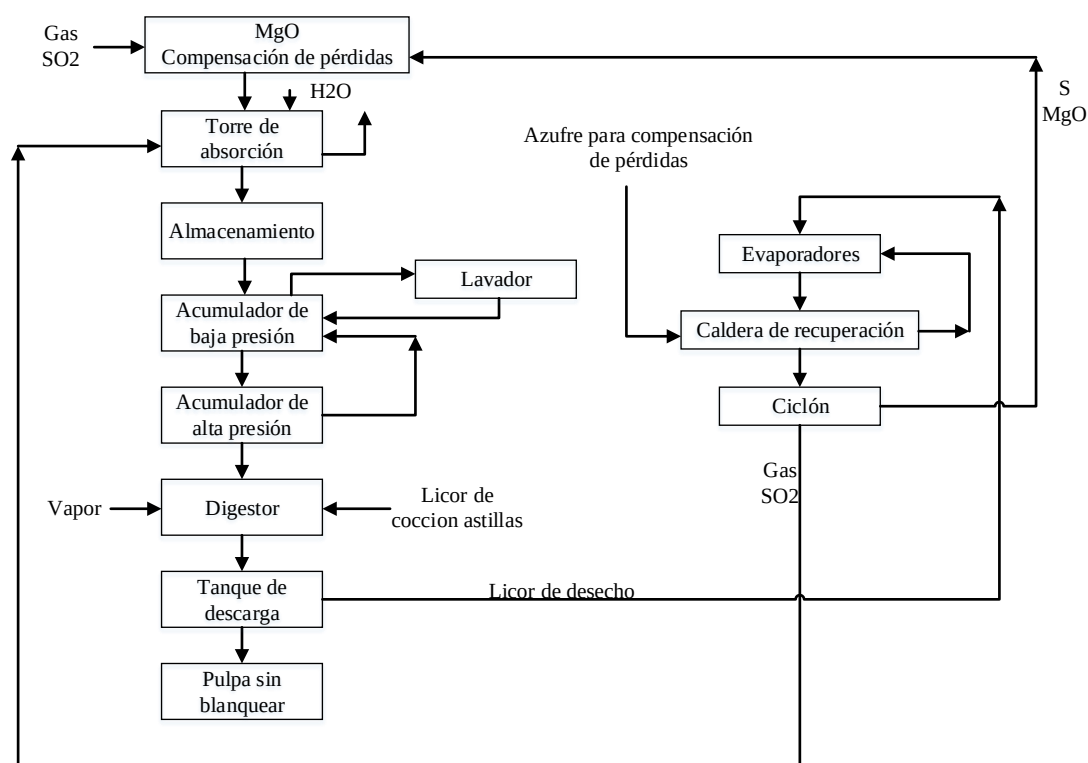
Descubierto en 1866 por el norteamericano B.C. Tilgman, quien observó que tratando la madera con ácido sulfuroso más bisulfito de calcio se obtenían pulpas brillantes y fáciles de blanquear. Sin embargo, se encontraron fuertes problemas de corrosión de los digestores de la época que hicieron fracasar comercialmente el proceso, hasta que en 1874 el sueco C.D. Ekman desarrollo digestores más resistentes a la corrosión que permitieron la puesta en funcionamiento de la primera planta comercial al sulfito.

El licor empleado es una mezcla de sulfito sódico (Na_2SO_3) y un compuesto que consiga regular el pH del medio a valores cercanos al neutro. El efecto del sulfito sódico sobre las fibras vegetales es sulfonar la lignina, transformándola en ácidos sulfónicos solubles. Los digestores se calientan lentamente hasta una temperatura de $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, realizando la digestión en un tiempo de 6 a 8 horas. Al aumentar la presión, el dióxido de azufre gaseoso (SO_2) se purga y se vuelve a mezclar con el ácido de la cocción.

Cuando quedan de 1 a 1,5 horas de cocción, se interrumpe la calefacción y se disminuye la presión extrayendo vapor de agua. La pasta se descarga en un tanque, se lava y criba. Este sistema proporciona ventajas de alto rendimiento alrededor del 60%, el bajo costo relativo de los reactivos, produce gases menos desagradables y la alta blancura de las pulpas obtenidas que permiten ser utilizadas para hacer papel sin previo blanqueo. La pulpa obtenida es más liviana, ligera y fácil de blanquear, sin embargo, tiene una resistencia menor y crea una gran contaminación al eliminar el licor residual sin tratar.

Debido a la baja calidad de la fibra, el alto consumo de energía, la baja capacidad de recuperación de reactivos y por la limitación al uso de materias primas, la tecnología de sulfito no se utiliza en la actualidad (Hortal & Pastor, 1992).

Figura I-11: Diagrama de flujo de proceso al sulfito



Fuente: (Cruz, 2009)

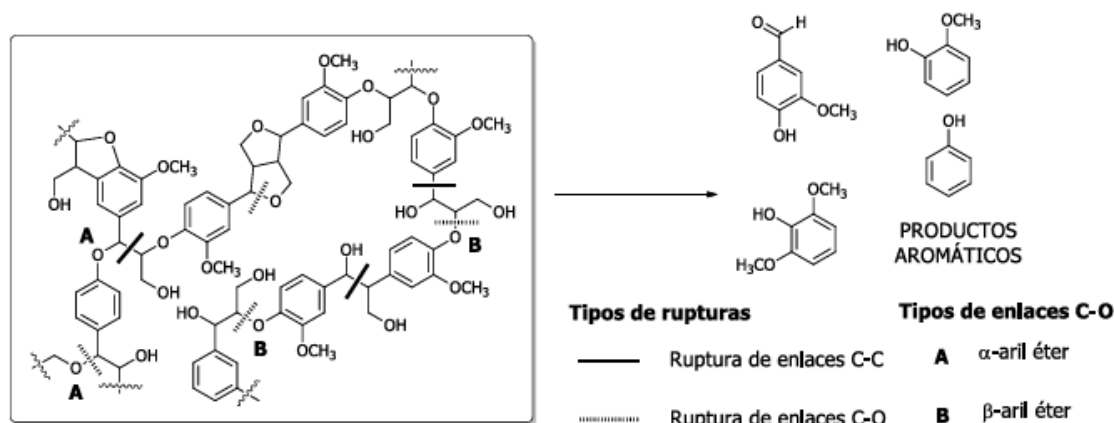
1.6.3.4 Reacciones de deslignificación en medio alcalino

La deslignificación es la degradación de la macromolécula de lignina y la formación de grupos que la hacen más soluble en un medio álcali.

Los reactivos utilizados en los procesos de deslignificación en medios alcalinos ocasionan la rotura de enlaces éter (C-O), formando compuestos aromáticos como ser fenoles, benceno, tolueno o xileno. Los enlaces éter conectan los diferentes monómeros en la estructura de la lignina.

En medio alcalino, las reacciones generan fragmentos con grupos fenólicos solubles en el medio. En una cocción alcalina dos tipos de reacciones degradativas son la rotura de enlaces α - y β -aril éter en las unidades fenólicas de la lignina (García & Colom, 1992).

Figura I-12: Principales rupturas de enlaces en la estructura de la lignina en el proceso de deslignificación y su conversión en monómeros de tipo aromático



Fuente: (García & Colom, 1992)

1.7 Factores que influyen en la obtención de pulpa de celulosa

Los principales factores a considerar, que afectan la eficiencia del proceso y las propiedades de la pulpa de celulosa, se muestran a continuación.

1.7.1 Especie y calidad de la materia prima vegetal

La composición de las fibras vegetales varía según la especie, es decir que, a partir de las proporciones de lignina, celulosa y hemicelulosa que contenga la especie vegetal, se verá afectado el rendimiento y la calidad de la pulpa de celulosa (Sampedro, 2012).

1.7.2 Tiempo de cocción

Se controla para lograr el grado de cocción deseado, medido por el rendimiento o el contenido en lignina. Cuando la reacción es lenta se requiere una cocción más prolongada, las cocciones “lentas” pueden afectar negativamente la productividad.

El tiempo de cocción está relacionado con la temperatura y la concentración del licor blanco. Un aumento en una de estas variables de temperatura o concentración, dentro de estos límites, disminuye o aumenta el tiempo de cocción para la obtención de pulpa de celulosa con el mismo rendimiento (Lombardo, 2005).

1.7.3 Temperatura de cocción

La temperatura influye en la velocidad de reacción química, si se trabaja a temperatura muy alta se aumentará la hidrólisis. El incremento de la temperatura guarda relación con la velocidad de reacción, de este modo, cada vez que se aumenta la temperatura en 10°C se duplica la velocidad de reacción. Con el aumento de temperatura, la materia vegetal disminuye su resistencia fisicomecánica, por ablandamiento de la lignina y disminución de enlaces de los componentes entre fibras (Lombardo, 2005).

La temperatura y el tiempo son variables dependientes ya que entre más alta es la temperatura, menor es el tiempo de digestión. En la digestión de fibras madereras una temperatura por debajo de los 150°C aparentemente no aporta ninguna ventaja ni en el rendimiento ni en la calidad de la pulpa de celulosa obtenida. Por encima de los 180°C la celulosa es muy susceptible a degradarse.

1.7.4 Concentración del licor de cocción

La concentración de los reactivos tiene un efecto muy importante sobre la velocidad de deslignificación. Una concentración baja promueve un efecto negativo ya que la acción

de los reactivos es menos selectiva hacia la lignina. Por el contrario, una concentración demasiado alta es desfavorable por disminuir la velocidad de reacción, reduciendo los tiempos de cocción sin que se logre un incremento del rendimiento, además de incurrir en gastos energéticos extras, disminuyendo la capacidad productiva del digestor.

La carga de reactivos es una variable que depende en gran medida de la especie a procesar y del espesor de las astillas. Si la concentración es demasiado baja no es deseable porque lo que se busca es impregnar las astillas (Lombardo, 2005).

1.8 Parámetros para medir la calidad de la pulpa de celulosa

La medición de parámetros permite controlar el proceso de fabricación y asegurar la calidad de la pulpa de celulosa final.

1.8.1 Rendimiento de pulpado

La determinación del rendimiento se realiza con el peso de la pulpa total producida y se divide entre el peso seco de la astilla alimentada al digestor (García, 2008).

1.8.2 Número de Kappa

Es un método que se aplica al grado deslignificación de la pulpa de celulosa, se puede utilizar para todos los tipos y grados de pulpas químicas y semiquímicas, sin blanquear y semiblanqueadas, con rendimientos inferiores al 60%.

El número de kappa es el volumen de solución de permanganato de potasio 0,1 N consumido por 1 g de pulpa sin humedad en las condiciones especificadas en este método. Los resultados se corrigen al 50% de consumo del permanganato añadido (TAPPI T 236, 1999).

El valor del índice de Kappa representa una medida indirecta de la cantidad de lignina residual en las fibras de la pulpa de celulosa cuando sale del digestor. Valores bajos de este parámetro facilitan el blanqueo (Luengo, Uyarte, & González, 2017).

1.8.3 Contenido de alfa-celulosa

Es la fracción más pura de la pulpa de celulosa, por lo que es de interés conocer su valor. Su análisis se realiza con la norma TAPPI T203 cm-pp (1999) donde se separa la fracción de celulosa insoluble en bases fuertes. Esta fracción es la celulosa en su forma más pura y su cantidad hace referencia a propiedades de la pulpa de celulosa como su capacidad para no degradarse y conservar su resistencia (Corpas, 2021).

1.8.4 Contenido de humedad

Es la cantidad de agua presente en la pulpa de celulosa en base seca. Al expresar este contenido en base seca se estandariza la medición, eliminando la influencia del agua (Jiménez, 2022).

1.8.5 Resistencia a la tensión

Es la máxima fuerza que la pulpa de celulosa puede soportar antes de romperse cuando se somete a una tensión en seco. Este ensayo proporciona información sobre la capacidad de la pulpa de celulosa para resistir la ruptura bajo carga. Es importante mencionar que este ensayo se afecta notablemente por el contenido de humedad reduciendo la resistencia a la tensión (Libby, 1967).

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción de la materia prima

La cáscara de maní que se va usar para obtener la pulpa de celulosa es de la variedad Bayo (*Arachis hypogaea L.*) la cual es adquirida de la comunidad de Sachapera, ubicada en el municipio de Yacuiba del departamento de Tarija.

Se seleccionó esta variedad de cáscara debido a la mayor disponibilidad de variedad Bayo (*Arachis hypogaea L.*) en el departamento de Tarija, lo que pudo facilitar la provisión de materia prima.

Su periodo de siembra es en los meses de octubre, noviembre y diciembre y su cosecha es en los meses de mayo, junio y julio. Es de tipo Runner, contiene dos granos por vaina, es de forma esférica mediana y el color de la semilla es crema o bayo.

Figura II-1: Cáscara de maní Bayo del municipio de Yacuiba



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.2 Selección del método de obtención de pulpa de celulosa

Como se vio en el capítulo I, los tres procesos principales para la obtención de pulpa de celulosa son el proceso a la sosa, el proceso Kraft y el proceso al sulfito. Para su selección, se aplicó el método de factores ponderados para realizar un análisis cuantitativo, consiste en comparar los factores clave y elegir el mejor proceso de obtención de pulpa de celulosa según sea el que acumule mayor puntaje.

En la tabla II-1 se establecieron las calificaciones ponderadas del uno al diez.

Tabla II-1: Escala de calificación

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	10
Muy Bueno	8
Buena	6
Regular	5

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla II-2 se observa los factores que se evaluarán en los distintos procesos de obtención de pulpa de celulosa con su ponderación asignada.

Tabla II-2: Factores a evaluar

Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Ponderación
Simplicidad del proceso	Se desea que el proceso agilice las operaciones con los procesos fundamentales, no siendo muy extenso.	10
Disponibilidad de reactivos	Se desea utilizar reactivos disponibles, de fácil acceso.	30
Tiempo de cocción	Se desea tener un tiempo de cocción óptimo y no muy extenso.	5
Operación	Se desea una operación flexible y confiable.	20
Rendimiento del proceso	Se desea un rendimiento óptimo.	35

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla II-3 se observa la selección del proceso experimental de obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní, donde se califica los factores evaluados a cada proceso para luego determinar el mejor proceso según el que tenga mayor puntaje.

Donde:

A= Calificación

%= Porcentaje de calificación del factor evaluado

$B = (A * \%) / (100\%)$

Tabla II-3: Selección del proceso experimental de obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní

Factor evaluado	%	Proceso a la sosa		Proceso Kraft		Proceso al sulfito	
		A	B	A	B	A	B
Simplicidad del proceso	10	8	0,8	6	0,6	2	0,2
Disponibilidad de reactivos	30	10	3	6	1,8	4	1,2
Tiempo de cocción	5	6	0,3	8	0,4	2	0,1
Operación	20	10	2	8	1,6	2	0,4
Rendimiento del proceso	35	6	2,1	8	2,8	4	1,4
Total	100		8,2		7,2		3,3

Fuente: Elaboración propia, 2025.

De acuerdo a la tabla II-3 se observa que el proceso a la sosa es el que tiene mayor puntaje final respecto a los otros dos procesos, por lo que el proceso que se aplica es el proceso a la sosa, contando con las condiciones y equipos necesarios en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.

2.3 Diseño experimental

El diseño de experimentos es fundamental en la investigación científica, nos ayuda a identificar qué variables afectan el comportamiento de un proceso productivo.

2.3.1 Variables que afectan en la obtención de pulpa de celulosa

Como variable dependiente se tiene el rendimiento del pulpado en base seca (%p/p) y como variables independientes se tienen la concentración de NaOH, tiempo y temperatura de cocción.

2.3.1.1 Selección de variables para el proceso de obtención de pulpa de celulosa

En el presente proyecto de investigación se toma en cuenta como variable dependiente el rendimiento en base seca de pulpa de celulosa por permitir una comparación estandarizada de los resultados. En base seca se elimina la influencia del contenido de humedad facilitando la evaluación del impacto de las variables independientes sobre la calidad del producto final.

Para definir las variables independientes se trabajó sobre la etapa fundamental del proceso que es la cocción por ser donde ocurre la separación de las fibras de celulosa.

En la tabla II-4 se citan distintos proyectos de investigación realizados a escala laboratorio por varios autores para la obtención de productos similares a partir de residuos agrícolas. Se observan en cada uno de ellos los parámetros óptimos utilizados en la etapa de cocción, necesarios para considerarlos como referencia en el desarrollo experimental de la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní.

Tabla II-4: Parámetros utilizados en la digestión de diferentes autores

Proyecto de investigación	Parámetros de digestión	Proceso empleado	Rendimiento del proceso	Autor
"Obtención de papel a partir de la cáscara de maní (<i>Arachis hypogaea</i>)"	40% NaOH 170°C 120 min	Kraft	45,1%	(Espinoza & Leon, 2017)
"Producción de papel artesanal a partir de residuos de cáscara de naranja de las juguerías del Mercado Tahuantinsuyo"	15% NaOH 90°C 120 min	Sosa	11,73%	(Padilla, 2017)
"Obtención de pulpa de celulosa para producir papel a escala laboratorio a partir del pinzote de plátano (<i>Musa balbisiana</i>) cultivado en el trópico boliviano"	20% NaOH 120°C 90 min	Sosa	28,24%	(Estrada, 2022)
"Producción de bioetanol a partir de cascarilla de arroz mediante hidrólisis enzimática"	8% NaOH 121°C 120 min	Sosa	38,88%	(Tejerina, 2023)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

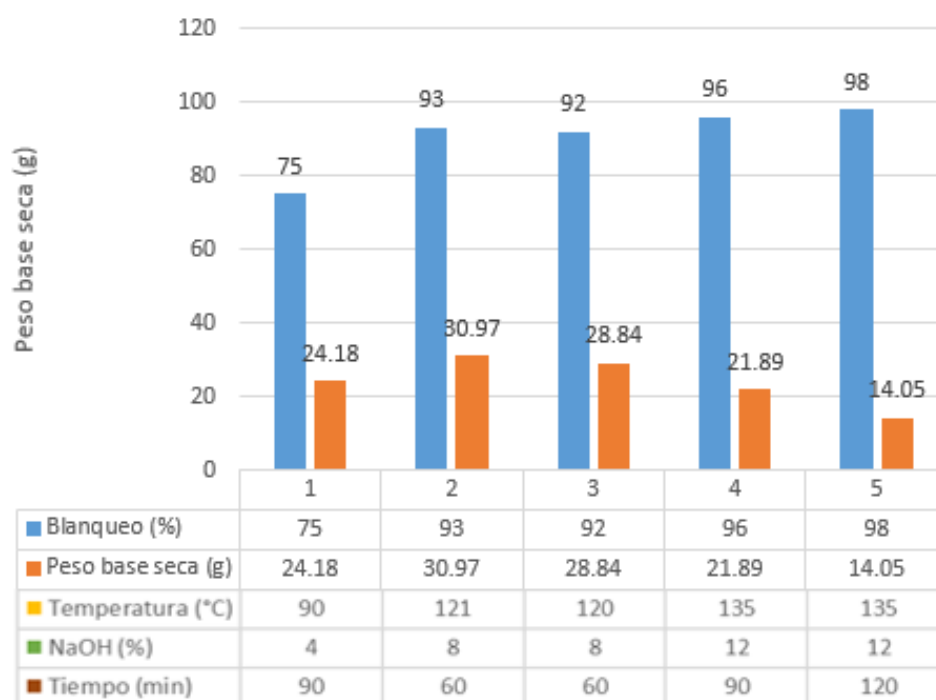
A partir de los datos mencionados en la tabla II-4 se extrajeron los tres factores de mayor incidencia en la etapa de cocción: concentración de NaOH, tiempo de cocción y temperatura de cocción por ser los de mayor referencia.

Para encontrar los valores mínimos y máximos que se utilizarán en el diseño factorial se investigó primero el rendimiento teórico de pulpa de celulosa en base seca a partir de residuos agrícolas, este rendimiento teórico se encuentra entre el 40 y 50%, este dato también es necesario para ayudar a evaluar la eficiencia del proceso.

Se realizaron cinco pruebas preliminares para definir los valores mínimos y máximos de cada factor. Para una mejor visualización se los representó en el siguiente gráfico, donde mediante barras se muestra la variación del porcentaje de blanqueo de la pulpa de celulosa en base seca respecto al peso de pulpa de celulosa en base seca.

En la tabla inferior, dentro del mismo gráfico, se visualizan el número de pruebas preliminares del 1 al 5, seguidamente el porcentaje de blanqueo, el peso de la pulpa de celulosa en base seca, la temperatura, el porcentaje de hidróxido de sodio y el tiempo que corresponde a cada prueba preliminar para hallar las variables mínimas y máximas.

Gráfico II-1: Porcentaje de blanqueo vs Peso de pulpa de celulosa en base seca



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Las variables elegidas fueron las que corresponden a las pruebas preliminares 3 y 4:

- Concentración de NaOH: Se seleccionó un nivel bajo de 8% y un nivel alto de 12%, debido a que, a menores concentraciones, el NaOH elimina muy poca

cantidad de lignina y a mayores concentraciones, comienza a atacar a la celulosa disminuyendo el peso de la pulpa de celulosa obtenida.

- Temperatura de cocción: Se seleccionó un nivel bajo de 120°C y un nivel alto de 135°C, el nivel bajo es debido a que a 120°C se obtiene una buena proporción de celulosa blanqueada. Se podría elegir la prueba 2 donde se obtiene mayor cantidad de celulosa blanqueada, pero para una mayor diferencia con el nivel alto se eligió la prueba 3. El nivel alto es debido a la limitación del equipo ya que la máxima temperatura de funcionamiento del autoclave es 139°C y exceder la temperatura de 135°C reduce la eficiencia del equipo.
- Tiempo de cocción: Se seleccionó un nivel bajo de 60 min por obtenerse una buena proporción de pulpa de celulosa blanqueada con un peso aceptable. Tiempos menores a 60 minutos no son suficientes para que el NaOH actúe con eficiencia sobre la cáscara dejando mucha cáscara sin digerir, lo cual se muestra luego en el porcentaje inferior de blanqueo. El nivel alto elegido de 90 min es debido a que el NaOH comenzó a atacar a la celulosa, evidenciándose por obtener un menor peso en base seca, y obtuvo una mayor cantidad de pulpa de celulosa blanqueada. En la prueba 5 se observa que a tiempos mayores el peso baja significativamente, por tanto, el rendimiento también, esto es desventajoso ya que lo que se busca en el proceso es obtener el mayor rendimiento posible con la mayor cantidad de celulosa posible.

2.4 Diseño factorial para la obtención de pulpa de celulosa

El diseño experimental es una serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las respuestas de salida (Montgomery, 1991).

Se aplica el diseño factorial 2^k , donde cada uno de los factores cuentan con dos niveles, estos niveles pueden ser cuantitativos o cualitativos. Este diseño describe como realizar los experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente qué efecto

tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos (Fernández, 2020).

Se aplicó el siguiente diseño factorial de dos niveles y tres variables

$$\text{Niveles} = 2$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ experimentos} = 2^3 = 8$$

Se estima una repetición, por tanto, el número de experimentos que se obtiene:

$$16 \text{ experimentos}$$

Los factores seleccionados y su dominio experimental se muestran a continuación:

Tabla II-6: Variables para el diseño factorial

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
A: Concentración de NaOH (%)	8	12
B: Tiempo de cocción (min)	60	90
C: Temperatura de cocción (°C)	120	135

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En este diseño se realizan todas las combinaciones posibles entre los efectos mediante una matriz de diseño, se utilizan los signos – y + para ambos niveles de un factor.

Se realiza de la siguiente forma: en la primera columna se alternan los signos, siempre se comienza por el -, en la segunda columna se alternan los signos de dos en dos, en la tercera columna de cuatro en cuatro y así sucesivamente (Fernández, 2020).

Tabla II-7: Matriz de experimentos y plan de experimentación

N°	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			
	A	B	C	Concentración NaOH (%)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Rendimiento en base seca (%)
1	-1	-1	-1	8	60	120	y1
2	+1	-1	-1	12	60	120	y2
3	-1	+1	-1	8	90	120	y3
4	+1	+1	-1	12	90	120	y4
5	-1	-1	+1	8	60	135	y5
6	+1	-1	+1	12	60	135	y6
7	-1	+1	+1	8	90	135	y7
8	+1	+1	+1	12	90	135	y8
9	-1	-1	-1	8	60	120	y9
10	+1	-1	-1	12	60	120	y10
11	-1	+1	-1	8	90	120	y11
12	+1	+1	-1	12	90	120	y12
13	-1	-1	+1	8	60	135	y13
14	+1	-1	+1	12	60	135	y14
15	-1	+1	+1	8	90	135	y15
16	+1	+1	+1	12	90	135	y16

Fuente: Elaboración propia, 2025.

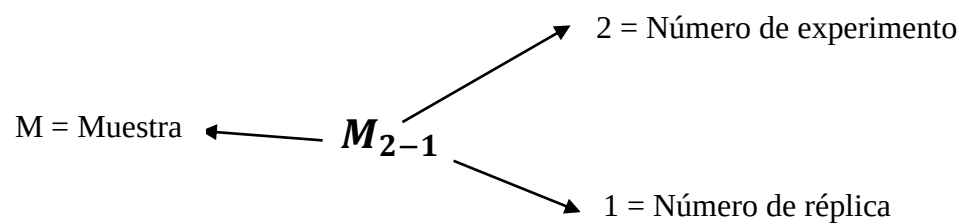
En la tabla II-8 se encuentra el plan de experimentación para cada repetición a realizar.

Tabla II-8: Plan de experimentación para cada repetición

Muestra	Concentración NaOH (%)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	
M_{1-1}	8	60	120	Réplica 1
M_{2-1}	12	60	120	
M_{3-1}	8	90	120	
M_{4-1}	12	90	120	
M_{5-1}	8	60	135	
M_{6-1}	12	60	135	
M_{7-1}	8	90	135	
M_{8-1}	12	90	135	
M_{1-2}	8	60	120	Réplica 2
M_{2-2}	12	60	120	
M_{3-2}	8	90	120	
M_{4-2}	12	90	120	
M_{5-2}	8	60	135	
M_{6-2}	12	60	135	
M_{7-2}	8	90	135	
M_{8-2}	12	90	135	

Fuente: Elaboración propia, 2025.

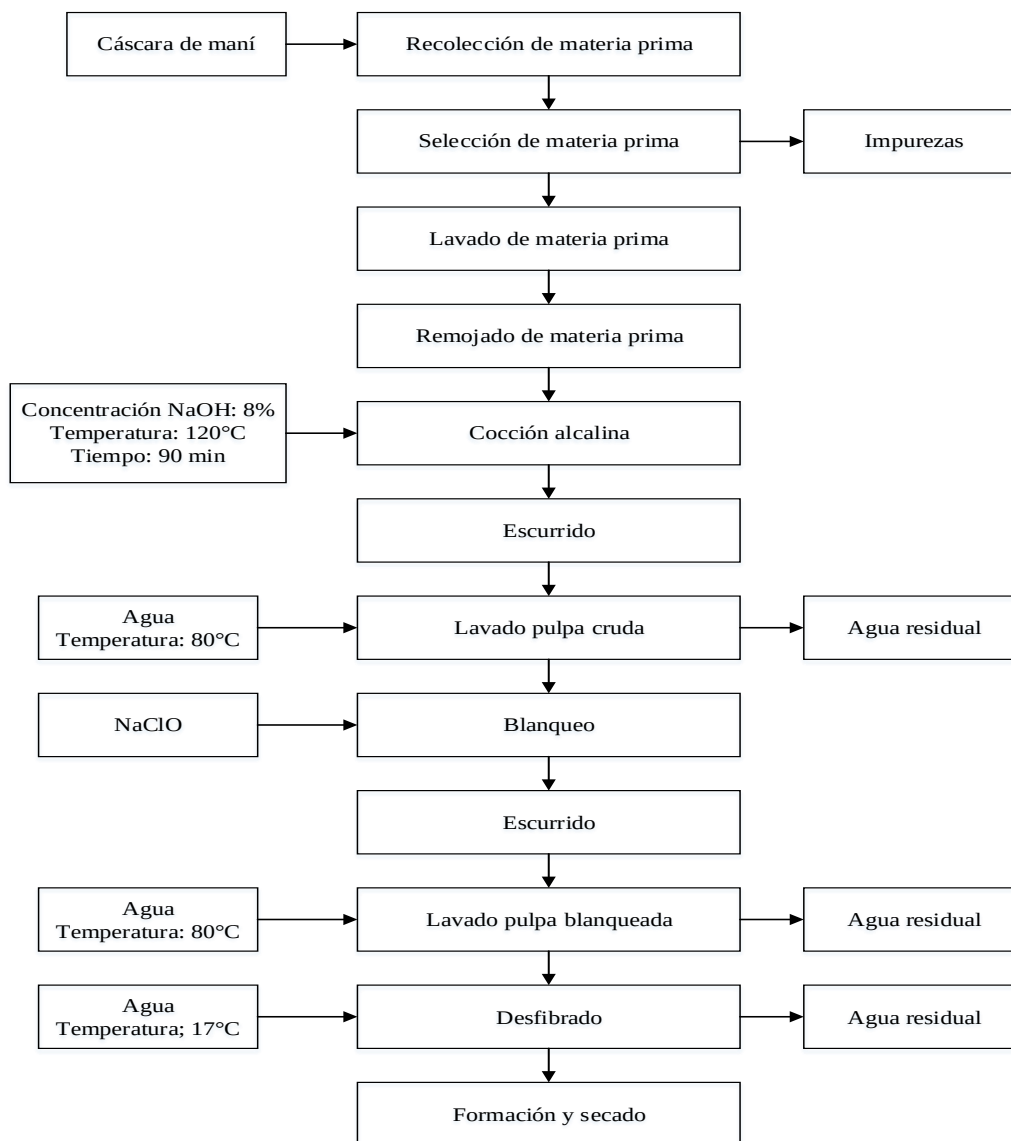
Descripción de la abreviación M_{2-1} :



2.5 Diseño del proceso experimental para la obtención de pulpa de celulosa

En la figura II-2 se observan las etapas del proceso experimental para la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.).

Figura II-2: Diagrama de bloques del proceso de obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se procede a describir las etapas del proceso de obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.).

2.5.1 Recepción de materia prima

La materia prima es la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) proveniente de los cultivos de maní de la comunidad Sachapera del municipio de Yacuiba, provincia Gran Chaco del departamento de Tarija. En la figura II-3 se muestra la cáscara de maní al llegar al domicilio particular en un saco y al lado derecho al ser abierto.

Figura II-3: Recepción de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.2 Selección de materia prima

La selección de las cáscaras de maní se realizó en el domicilio particular por necesitarse de mucho tiempo separar las impurezas de las cáscaras. Las impurezas se separan manualmente, entre estas se encuentran: tegumento, semillas de maní, tierra, raíces y troncos pequeños de la planta de maní. Una vez seleccionado las cáscaras se llevan a un recipiente de 5 litros para llevarlas a la universidad y comenzar con su tratamiento. En la figura II-4 se observa las cáscaras de maní seleccionadas y del lado derecho las impurezas encontradas.

Figura II-4: Selección de las cáscaras de maní



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.3 Lavado de materia prima

Se sumerge las cáscaras de maní en abundante agua para eliminar restos de tierra e impurezas no deseadas. Luego se las deposita en un colador para separarlas del agua de lavado, como se puede observar en la figura II-5.

Figura II-5: Lavado de las cáscaras de maní

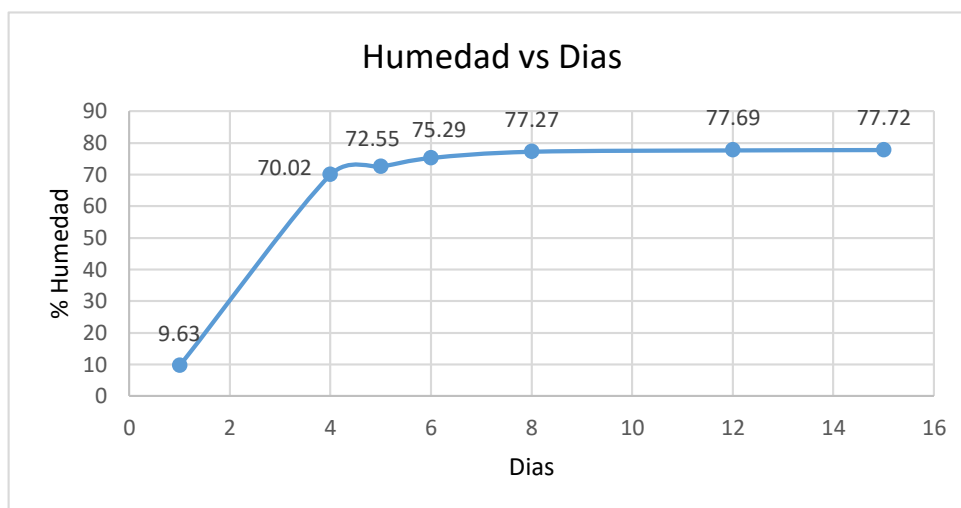


Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.4 Remojado de materia prima

Esta etapa se utilizó como una técnica empleada en la industria de papel y celulosa a partir de recursos madereros, la cual consiste en que un alto contenido de humedad en la madera contribuye a una mayor facilidad de desfibrado, siendo la humedad preferible de 45-50%. La madera de bajo contenido de humedad es remojada en un cierto periodo de tiempo antes de la digestión. Someter las cáscaras a remojo disuelve algunos extractivos solubles en agua provocando el ablandamiento forzado de las cáscaras.

En el gráfico II-2 se observa el incremento de humedad que fueron adquiriendo las cáscaras de maní al paso de los días hasta llegar a una humedad entre el 75 y 78%, ya que el incremento de humedad en las cáscaras no variaba significativamente en los días posteriores, como se observa en el gráfico II-2. Además, entre estos rangos de porcentaje de humedad se producía un buen ablandamiento en las cáscaras. La humedad se midió en el secador infrarrojos del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Gráfico II-2: Incremento de humedad en las cáscaras de maní

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla II-9: Incremento de la humedad en base a días transcurridos

Días	Humedad (%L)
1	9.63
4	70.02
5	72.55
6	75.29
8	77.27
12	77.69
15	77.72

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El aumento de humedad no varió mucho en los días 8, 12 y 15, por lo que se decidió detener el remojo. Por tanto, según los datos recopilados del aumento de humedad en las cáscaras, se las somete a remojo por un periodo de 15 días en un recipiente con cierre hermético para evitar el ingreso de oxígeno, humedad y otras partículas. En la figura II-5 se puede observar las cáscaras de maní sometidas a remojo.

Figura II-6: Remojado de las cáscaras de maní



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.5 Cocción alcalina

Para la cocción alcalina se usa la relación 1:10, es decir, por 1 gramo de materia se usan 10 ml de solución. La solución alcalina es al 8% y el ciclo de cocción se cumple a una temperatura constante de 120°C durante un tiempo de 90 min. Para realizar la cocción se utilizó el autoclave simulando un digestor, se procede a ingresar el licor blanco en las cáscaras de maní remojadas, estos dos observan en la figura II-7.

Figura II-7: Solución alcalina y cáscaras de maní



Fuente: Elaboración propia, 2025.

A continuación, en la figura II-8 se muestra la puesta en marcha del autoclave.

Figura II-8: Puesta en marcha del autoclave



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.6 Ecurrido

Después de la cocción se obtiene pulpa cruda color marrón con licor negro. Para separar la pulpa cruda del licor negro, se escurre en un colador de plástico de malla fina, haciendo que el licor negro se escurra en la parte inferior. En la figura II-9 se observa el escurrido de la pulpa cruda y el licor negro separado.

Figura II-9: Ecurrido de la pulpa cruda y licor negro separado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.7 Lavado pulpa cruda

La pulpa cruda se lava para eliminar y desplazar el licor negro residual que contaminaría la pulpa de celulosa en las subsiguientes etapas. Se utiliza agua caliente a 80°C para retirar con mayor facilidad el licor residual. El lavado termina cuando se alcanza un pH cercano al neutro, lo cual se observa en la figura II-10, indicando la disminución de la alcalinidad de la pulpa cruda. En esta etapa se asegura que la posterior etapa de blanqueo sea efectiva con una pulpa más limpia y de mayor calidad.

Figura II-10: pH final del agua de lavado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.8 Blanqueo

El primer periodo de blanqueo es una continuación del proceso de deslignificación iniciado en la cocción. El último periodo es para destruir y eliminar el color residual. La pulpa cruda se sometió a blanqueo con hipoclorito de sodio al 5,5% con una concentración de 55 gramos de cloro activo por litro de solución y se realizó en un periodo de 12 horas. En la figura II-11 se observa la pulpa antes y posterior al blanqueo.

Figura II-11: Pulpa antes y posterior al blanqueo



Fuente: Elaboración propia, 2025.

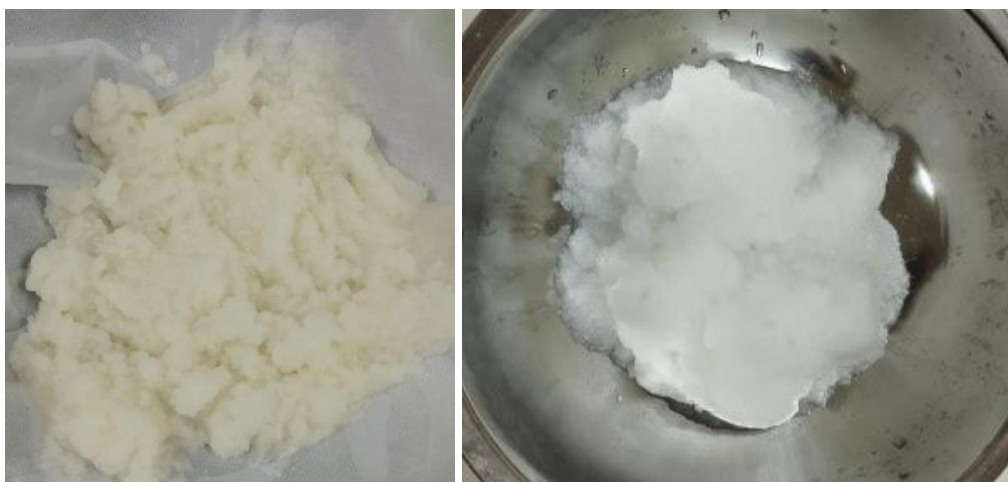
2.5.9 Ecurrido

Se escurre la pulpa blanqueada para retirar el hipoclorito de sodio residual utilizando un colador de malla fina para retirar la mayor cantidad posible de líquido residual.

2.5.10 Lavado pulpa blanqueada

El lavado se realiza con abundante agua caliente (80°C) para eliminar con mayor facilidad restos de hipoclorito de sodio, el lavado termina al alcanzar un pH cercano al neutro. En la figura II-12 se observa la pulpa de celulosa blanqueada antes y después del lavado que contribuye a la homogeneidad aportando el color blanco a la pulpa.

Figura II-12: Antes y después del lavado de la pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.11 Desfibrado

En esta etapa se separan y cortan las fibras aumentando su superficie de contacto y creando enlaces entre ellas, dando lugar a una mayor resistencia y mejor calidad del producto final. El desfibrado se realiza con agua purificada para no contaminar la pulpa blanqueada y se lleva a cabo en una licuadora en un tiempo de 1 minuto.

Las fibras de celulosa se hinchan permitiendo que en las puntas de las fibras formen fibrillas que facilitan las uniones de enlace por puente de hidrógeno entre fibras. En la figura II-13 se encuentra la pulpa de celulosa en la etapa de desfibrado.

Figura II-13: Desfibrado de la pulpa de celulosa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.12 Formación y secado

La pulpa de celulosa desfibrada se descarga en un molde de madera con malla fina de tela para retener la mayor cantidad posible de celulosa y darle la forma similar a una plancha de celulosa cuadrada, como se encuentra en la figura II-14.

Figura II-14: Pulpa de celulosa ingresando al molde



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El secado se llevó a cabo en el secador de tiro forzado para retirar la humedad a una temperatura de 45°C hasta alcanzar una humedad del 10% en la pulpa de celulosa, siendo el valor permitido de comercialización y conservación de pulpa de celulosa en base seca. En la figura II-15 se observa la pulpa de celulosa ingresando al secador infrarrojo y como queda finalmente después del secado.

Figura II-14: Pulpa de celulosa antes y después del secado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

CAPÍTULO III
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de la cáscara de maní

Para el análisis fisicoquímico de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) se analizaron la humedad y cenizas en el CEANID (Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo), ubicado en la UAJMS (Universidad Autónoma Juan Misael Saracho).

El contenido de humedad en las cáscaras es importante para tener la humedad a un inicio en la etapa de remojo y luego proseguir con la toma de medidas de humedad en el hinchamiento de la cáscara.

El contenido de cenizas es necesario ya que un alto contenido hace más difícil el tratamiento químico por interferir en la digestión y afectar el proceso de deslignificación. Además, se afecta la blancura y la resistencia de la pulpa. Para obtener un buen rendimiento, el residuo agrícola debe tener un contenido menor al 5% en peso seco, cantidades superiores requieren en el residuo agrícola un pretratamiento.

El contenido de humedad y cenizas en la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) realizados en el CEANID se detallan a continuación en la tabla III-1:

Tabla III-1: Características fisicoquímicas de la cáscara de maní

Cáscara de maní bayo (<i>Arachis hypogaea</i> L.)		
Parámetro	Valor	Unidad
Humedad	8,67	g/100g
Cenizas	3,16	g/100g

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), 2025.

Ver Anexo I donde se encuentran los análisis fisicoquímicos de humedad y cenizas realizados a la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.)

El análisis de celulosa, lignina y extractivos en la cáscara de maní no se pudo realizar en un laboratorio del país y para llevarlas a otro país el costo era elevado, por lo que se sacó estos datos de referencia bibliográfica, lo cual se observa en la tabla III-2:

Tabla III-2: Parámetros sacados de referencia bibliográfica

Cáscara de maní (<i>Arachis hypogaea</i> L.)		
Parámetro	Valor	Unidad
Celulosa	42,62	%
Lignina	34,0	%
Extractivos	3,0	%

Fuente: (Jimenez, da Silva, Umlandt, Gatani, & Medina, 2020)

El contenido de celulosa en las cáscaras es el componente principal ya que un mayor contenido de celulosa indica un mayor aprovechamiento de la biomasa, reduciendo el desperdicio de las cáscaras y las pulpas de celulosa que genera tienen mejor resistencia.

El contenido de lignina en las cáscaras es fundamental ya que es el principal obstáculo en el proceso de separación de celulosa. Contenidos mayores al 25% requieren un proceso agresivo con tratamientos alcalinos intensos con mayor consumo de reactivos.

3.2 Cuantificación de los rendimientos de pulpa de celulosa obtenidos

Para obtener el rendimiento de cada muestra, se debe tener la masa de la pulpa de celulosa obtenida en base seca de cada experimento y la masa de la cáscara inicial de maní, posteriormente se emplea la siguiente ecuación 3.1:

$$\text{Rendimiento de pulpado} = \frac{\text{Masa de pulpa de celulosa obtenida}}{\text{Masa de cáscara de maní}} * 100\% \quad \text{Ec. 3.1}$$

Los resultados del rendimiento de pulpa de celulosa en base seca obtenidos se muestran a continuación en la tabla III-3:

Tabla III-3: Resultados de rendimientos en base seca de pulpa de celulosa

Muestras de pulpa de celulosa	Rendimientos en base seca obtenidos (%)
M_{1-1}	31,197
M_{2-1}	32,854
M_{3-1}	41,206
M_{4-1}	30,853
M_{5-1}	26,963
M_{6-1}	19,872
M_{7-1}	27,026
M_{8-1}	21,113
M_{1-2}	31,953
M_{2-2}	31,903
M_{3-2}	40,556
M_{4-2}	35,174
M_{5-2}	27,288
M_{6-2}	20,603
M_{7-2}	29,421
M_{8-2}	18,283

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se observa que la muestra 3 y su réplica presentan el máximo rendimiento de pulpa de celulosa en base seca a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.).

3.3 Resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos de alfa-celulosa y lignina de la pulpa de celulosa con mejor rendimiento

Para determinar la calidad de la pulpa de celulosa obtenida, se llevó la pulpa de celulosa a un laboratorio para realizar el análisis fisicoquímico de alfa-celulosa y lignina en la pulpa. Este análisis se realizó en el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)

ubicado en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los resultados para determinar la calidad de la pulpa de celulosa, se muestran a continuación en la tabla III-4:

Tabla III-4: Caracterización de alfa-celulosa y lignina en la muestra de pulpa de celulosa en base seca

Pulpa de celulosa en base seca		
Parámetro	Valor	Unidad
α -Celulosa	42,2	%
Lignina	4,36	%

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A partir del contenido de α -Celulosa se determina la cantidad de celulosa más pura en la muestra de pulpa de celulosa en base seca con la siguiente ecuación 3.2:

$$\alpha - \text{Celulosa en la muestra: } \frac{(\text{Masa de pulpa}) * (\% \alpha\text{-Celulosa})}{100\%} \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\alpha - \text{Celulosa en la muestra: } \frac{(41,206 \text{ g}) * (42,2\%)}{100\%}$$

$$\alpha - \text{Celulosa en la muestra: } 17,389 \text{ g}$$

Esto significa que, en 41,206 g de pulpa de celulosa en bruto, hay 17,389 g de alfa-celulosa para fabricar productos derivados de celulosa pura.

A partir del contenido de lignina se sabe la cantidad no deseada en el producto, esto se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Lignina en la muestra: } \frac{(\text{Masa de pulpa}) * (\% \text{Lignina})}{100\%} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\text{Lignina en la muestra: } \frac{(41,206 \text{ g}) * (4,36\%)}{100\%}$$

Lignina en la muestra: 1,796 g

Esto significa que en 41,206 g de pulpa de celulosa en bruto hay 1,796 g de lignina remanente que no pudo ser eliminada en el proceso.

En el Anexo II se muestra los resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos de alfa-celulosa y lignina realizados a la pulpa de celulosa en base seca.

3.4 Resultados obtenidos del ensayo mecánico de resistencia a la tracción en la pulpa de celulosa en base seca

Para encontrar la resistencia de la pulpa de celulosa en base seca se procedió a utilizar un sistema del laboratorio de física de la UAJMS para medir la resistencia a la tracción de diversos materiales.

Ver Anexo III donde se encuentra el sistema para medir la tracción en la pulpa de celulosa e incluye las medidas de la muestra de la pulpa de celulosa utilizada.

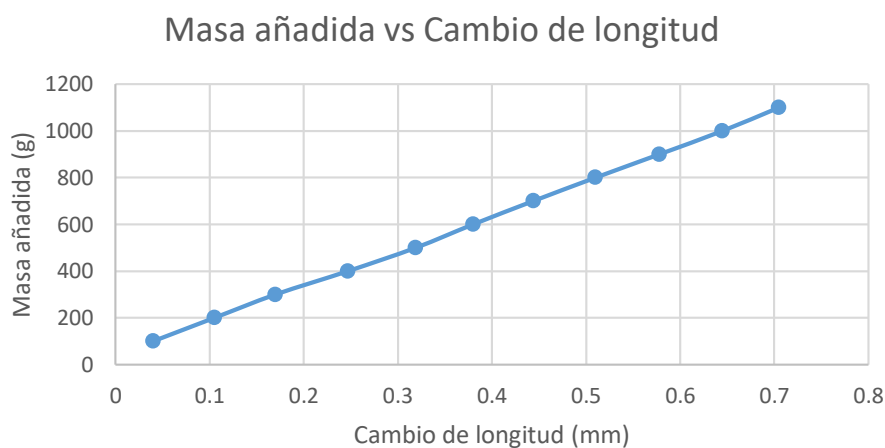
Las medidas obtenidas por cada 100 g de masa empleados hasta lograr la ruptura de la muestra de pulpa de celulosa en base seca se muestran en la siguiente tabla III-5:

Tabla III-5: Medidas del ensayo de resistencia en la muestra de pulpa de celulosa

Masa añadida (g)	Cambio de longitud (mm)
100	0,40
200	0,105
300	0,170
400	0,247
500	0,319
600	0,380
700	0,444
800	0,510
900	0,578
1.000	0,645
1.100	0,705

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la siguiente gráfica III-1 se muestra el incremento del esfuerzo vs la deformación de cada medida realizada en la pulpa de celulosa en base seca hasta llegar a la medida final que es cuando la pulpa de celulosa se rompió, no soportando más el esfuerzo.

Gráfica III-1: Masa añadida vs Cambio de longitud

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Estas medidas se introducen en la siguiente ecuación 3.5:

$$E = \frac{T}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\varepsilon_o}{L_o}}$$

$$E = \frac{\frac{m * g}{a * e}}{\frac{\varepsilon_o}{L_o}}$$

$$E = \frac{\frac{(1,1 \text{ kg}) * (9,81 \frac{m}{s^2})}{(0,5 \text{ cm}) * (0,292 \text{ cm})}}{\frac{0,0705 \text{ cm}}{1,9 \text{ cm}}}$$

$$E = 1991,93 \frac{N}{cm^2}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

T = Tensión

ε = Deformación

F = Fuerza

A = Área

ε_o = Cambio en la longitud

L_o = Longitud original

m = Cantidad de masa añadido

g = Gravedad

a = Ancho

e = Espesor

El valor de $1.991,93 \text{ N/cm}^2$ indica que la pulpa de celulosa en base seca puede resistir una fuerza de $1.991,93 \text{ N/cm}^2$ antes de romperse. Para comparar este resultado se menciona a continuación valores de resistencia a la tracción de muestras de pulpa de celulosa en base seca a partir de fibras residuales de alcachofa, malva y maíz medidas por (Dhía, 2021) en su trabajo de “Estudios de fuentes alternativas a la madera para la obtención de la celulosa”.

Tabla III-6: Resistencia de pulpa de celulosa en base seca a partir de otras fibras

Materia prima utilizada	Resistencia a la tracción (N/cm²)
Fibras de alcachofa	232,7
Fibras de malva	146,9
Fibras de maíz	260,4

Fuente: (Dhía, 2021)

Comparando la resistencia a la tracción de la pulpa de celulosa obtenida a partir de la cáscara de maní con las fibras residuales mencionadas, se observa que $1991,93 \text{ N/cm}^2$ es un valor alto presentando una buena formación de enlaces entre fibras.

3.5 Disolución de la pulpa de celulosa obtenida

Debido a que la pulpa de celulosa se disuelve para transformarse en otros productos, se hizo la disolución de la pulpa de celulosa en base seca obtenida para verificar si su disolución es homogénea con la misma concentración de celulosa en todo el volumen para comprobar un proceso uniforme aplicado en todas las cáscaras de maní.

Se disolvió la pulpa de celulosa en base seca en 500 ml de agua de grifo. Posteriormente, se mezcló con 1,5 litros de agua de grifo para dispersar la pulpa de celulosa disuelta. Y se introdujeron los moldes en la mezcla, como se observa en la figura III-1, para formar láminas de hojas con el tamaño propio del molde utilizado.

Figura III-1: Pulpa de celulosa diluida



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la figura III-2 se muestran las láminas de hojas que se obtuvieron luego de disolver la pulpa de celulosa, verificando que la disolución fue homogénea.

Figura III-2: Hojas luego de la disolución de la pulpa de celulosa en base seca



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.6 Balance de materia y energía

Los balances de materia y energía se realizaron según los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto.

3.6.1 Balance de materia del proceso de obtención de pulpa de celulosa

Se realiza el balance de materia del proceso de obtención de pulpa de celulosa con la muestra de mayor rendimiento, la muestra M_3 , el cual usó variables de concentración de NaOH 8% y en la cocción un tiempo de 90 minutos y una temperatura de 120 °C.

Tabla III-7: Corrientes de proceso

Corriente (g)	Especificación
A	Entrada de materia prima
B	Impureza
C	Cáscara de maní seleccionada
D	Agua de grifo
E	Agua residual
F	Cáscara de maní con agua
G	Agua de grifo
H	Agua residual
I	Cáscara de maní remojada
J	Solución alcalina
K	Pulpa cruda con licor negro
L	Licor negro escurrido
M	Pulpa cruda escurrida
N	Agua caliente
Ñ	Agua residual
O	Pulpa cruda lavada
P	Hipoclorito de sodio
Q	Pulpa blanqueada con reactivo residual
R	Reactivo escurrido
S	Pulpa de celulosa escurrida
T	Agua caliente
U	Agua residual
V	Pulpa de celulosa lavada
W	Agua purificada
X	Pulpa de celulosa desfibrada
Y	Agua residual
Z	Pulpa de celulosa en base seca

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla III-8 se muestran las abreviaturas de los componentes que se utilizaron.

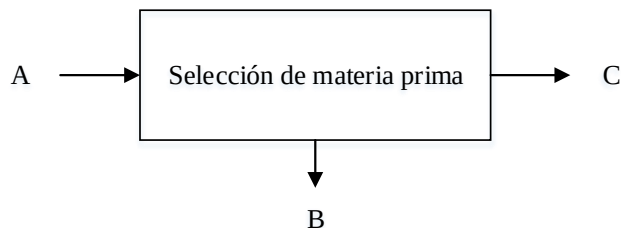
Tabla III-8: Nomenclatura de fórmulas química

Fórmula química	Nomenclatura sistemática
NaOH	Hidróxido de sodio
NaClO	Hipoclorito de sodio
H ₂ O	Agua

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para más detalle, a continuación, se presenta el balance de materia de cada etapa del proceso para la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.).

3.6.1.1 Etapa de selección de materia prima



A= Entrada de materia prima

B= Impureza

C= Cáscara de maní seleccionada

Balance global:

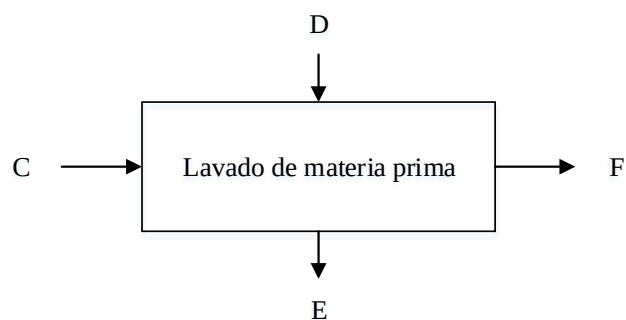
$$A = B + C \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$B = A - C$$

$$B = 119,856 \text{ g} - 100,001 \text{ g}$$

$$B = 19,855 \text{ g}$$

3.6.1.2 Etapa de lavado de materia prima



C= Cáscara de maní seleccionada

D= Agua de grifo

E= Agua residual

F= Cáscara de maní con agua

Balance global:

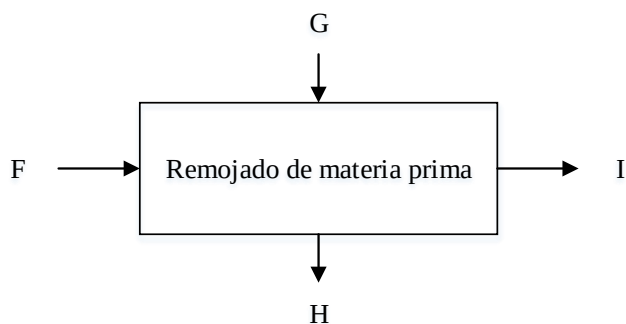
$$C + D = E + F \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$E = C + D - F$$

$$E = 100,001 \text{ g} + 1.000 \text{ g} - 222,688 \text{ g}$$

$$E = 877,313 \text{ g}$$

3.6.1.3 Etapa de remojo de materia prima



F= Cáscara de maní con agua

G= Agua de grifo

H= Agua residual

I= Cáscara de maní remojada

Balance global:

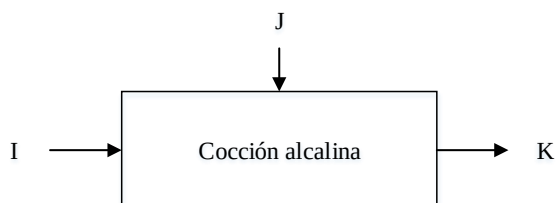
$$F + G = H + I \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$H = F + G - I$$

$$H = 222,688 \text{ g} + 1.000 \text{ g} - 393,745 \text{ g}$$

$$H = 828,943 \text{ g}$$

3.6.1.4 Etapa de cocción alcalina



I= Cáscara de maní remojada

J= Solución alcalina

K= Pulpa cruda con licor negro

Balance global:

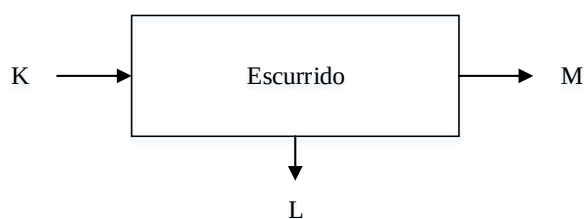
$$I + J = K \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$K = I + J$$

$$K = 393,745 \text{ g} + 1.080 \text{ g}$$

$$K = 1.473,745 \text{ g}$$

3.6.1.5 Etapa de escurrido



K= Pulpa cruda con licor negro

L= Licor negro escurrido

M= Pulpa cruda escurrida

Balance global:

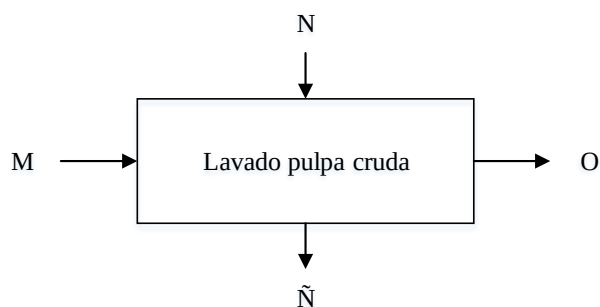
$$K = L + M \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$L = K - M$$

$$L = 1.473,745 \text{ g} - 347,869 \text{ g}$$

$$L = 1.125,876 \text{ g}$$

3.6.1.6 Etapa de lavado pulpa cruda



M= Pulpa cruda escurrida

N= Agua caliente (80°C)

Ñ= Agua residual

O= Pulpa cruda lavada

Balance global:

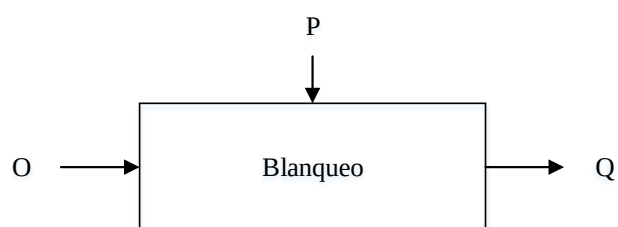
$$M + N = \tilde{N} + O \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$\tilde{N} = M + N - O$$

$$\tilde{N} = 347,869 \text{ g} + 3.000 \text{ g} - 322,134 \text{ g}$$

$$\tilde{N} = 3.025,735 \text{ g}$$

3.6.1.7 Etapa de blanqueo



O= Pulpa cruda lavada

P= Hipoclorito de sodio

Q= Pulpa blanqueada con reactivo residual

Balance global:

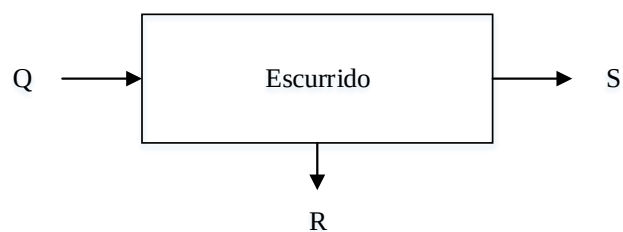
$$O + P = Q \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$Q = O + P$$

$$Q = 322,134 \text{ g} + 1.100 \text{ g}$$

$$Q = 1.422,134 \text{ g}$$

3.6.1.8 Etapa de escurrido



Q= Pulpa blanqueada con reactivo residual

R= Reactivo escurrido

S= Pulpa de celulosa escurrida

Balance global:

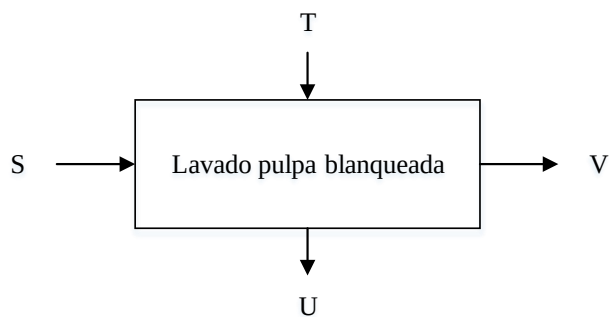
$$Q = R + S \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$R = Q - S$$

$$R = 1.422,134 \text{ g} - 338,742 \text{ g}$$

$$R = 1.083,392 \text{ g}$$

3.6.1.9 Etapa de lavado pulpa blanqueada



S= Pulpa de celulosa escurrida

T= Agua caliente (80°C)

U= Agua residual

V= Pulpa de celulosa lavada

Balance global:

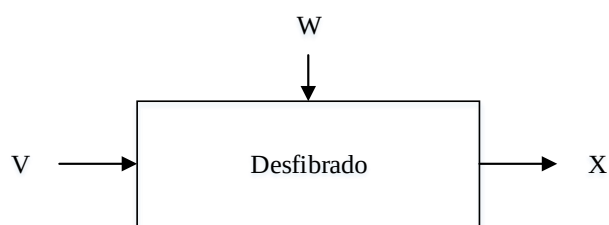
$$S + T = U + V \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$U = S + T - V$$

$$U = 338,742 \text{ g} + 2.000 \text{ g} - 392,016 \text{ g}$$

$$U = 1.946,726 \text{ g}$$

3.6.1.10 Etapa de desfibrado



V= Pulpa de celulosa lavada

W= Agua purificada

X= Pulpa de celulosa desfibrada

Balance global:

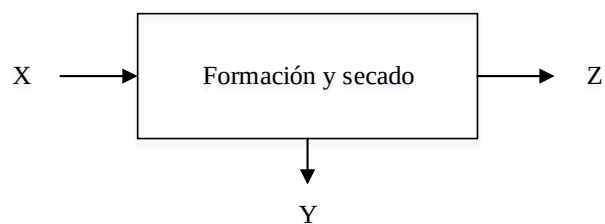
$$V + W = X \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$X = V + W$$

$$X = 392,016 \text{ g} + 300 \text{ g}$$

$$X = 692,016 \text{ g}$$

3.6.1.11 Etapa de formación y secado



X= Pulpa de celulosa desfibrada

Y= Agua residual

Z= Pulpa de celulosa en base seca

Balance global:

$$X = Y + Z \quad \text{Ec. 3.15}$$

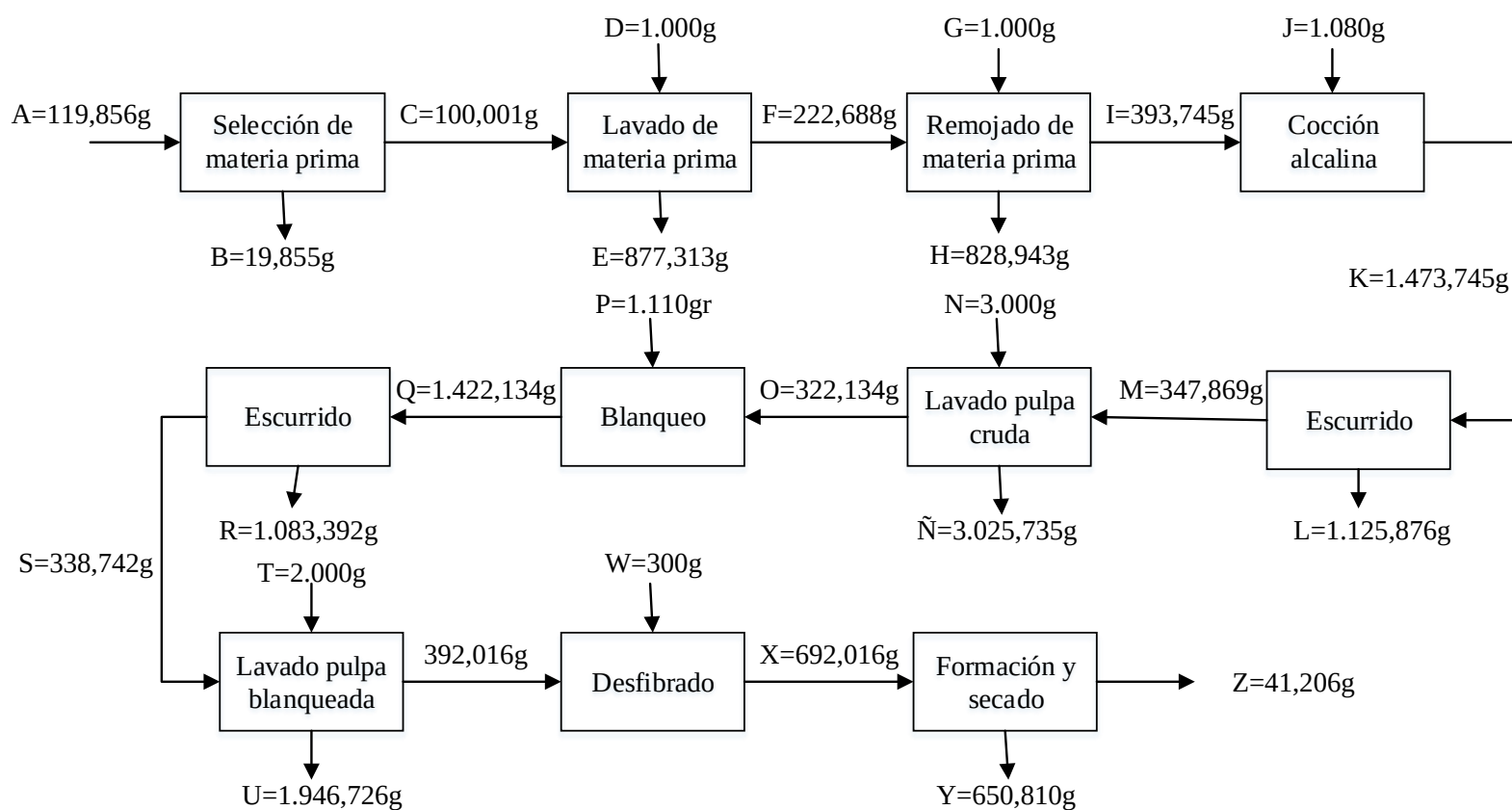
$$Z = X - Y$$

$$Z = 692,016 \text{ g} - 650,810 \text{ g}$$

$$Z = 41,206 \text{ g}$$

En la figura III-4 se presenta el resumen general del diagrama de flujo del balance de materia para la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.).

Figura III-4: Diagrama de flujo del balance de materia para obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.)



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Cantidad de agua total utilizado en el proceso

Para saber la cantidad de agua total utilizado en el proceso para producir 41,206 g de pulpa de celulosa en base seca, se procede a sumar los flujos de corrientes de entrada de agua empleados pertenecientes a las etapas de lavado de materia prima, remojo de materia prima, lavado pulpa cruda, lavado pulpa blanqueada y desfibrado.

$$\text{Agua total} = D + G + N + T + W \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$\text{Agua total} = 1.000 \text{ g} + 1.000 \text{ g} + 3.000 \text{ g} + 2.000 \text{ g} + 300 \text{ g}$$

$$\text{Agua total} = 7.300 \text{ g}$$

El agua utilizada tiene una temperatura de 17°C, a esta temperatura su densidad es de aproximadamente 0,9988 g/cm³, por lo que se utilizan estos datos para convertir la masa de agua total en unidades de volumen mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen agua total} = \frac{\text{Masa agua total}}{\text{densidad agua (17°C)}} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$\text{Volumen agua total} = \frac{7.300 \text{ g}}{0,9988 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Volumen agua total} = 7.308,77 \text{ cm}^3 = 7.308,77 \text{ ml} = 7,31 \text{ l}$$

Para producir 41,206 g de pulpa de celulosa en base seca se necesitaron 7.31 litros de agua en total.

La relación agua/pulpa de celulosa en base seca se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Relación agua/pulpa seca} = \frac{7.308,77 \text{ ml agua total}}{41,206 \text{ g pulpa en base seca}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

$$\text{Relación agua/pulpa seca} = 177,371 \text{ ml/g}$$

Se necesitan 177,371 ml de agua por gramo de pulpa de celulosa en base seca.

3.6.2 Balance de energía del proceso de obtención de pulpa de celulosa

Se desarrolla el balance de energía del proceso de obtención de pulpa de celulosa en las etapas donde hubo consumo de energía eléctrica. Este balance de igual forma se realiza con la muestra que obtuvo el mayor rendimiento, que es la muestra M_{3-1} .

3.6.2.1 Balance de energía en la cocción

La cocción se realizó en un autoclave (Ver anexo V), se toma en cuenta la presión a la que se trabajó y, mediante la tabla A-5 del libro “Termodinámica” (Cengel & Boles, 2006), se encuentra el calor latente de evaporización.

$$P_w = 1,25 \text{ bar} = 125 \text{ KPa}$$

$$\lambda_{\text{evaporización}} = 2240,6 \text{ kJ/kg}$$

La capacidad calorífica de la cáscara de maní se puede determinar en función del contenido de humedad presente en la estructura, con el análisis matemático propuesto por un trabajo de investigación titulado: “Propiedades dependientes de la humedad de las vainas, granos y cáscaras” (Bitra, Banu, Ramakrishna, Narender, & Womac, 2010)

$$C_{p_{\text{cáscara de maní}}} = 0,0563 * (\% \text{Humedad de la cáscara}) + 2,6185$$

Ec. 3.19

$$C_{p_{\text{cáscara de maní}}} = 0,0563 (8,67) + 2,6185$$

$$C_{p_{\text{cáscara de maní}}} = 3,107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Se determina la capacidad calorífica de la mezcla:

$$C_{p_{\text{mezcla}}} = C_{p_i} * x_i \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$C_{p_{\text{mezcla}}} = C_{p_{\text{cáscara}}} * x_{\text{cáscara}} + C_{p_{\text{agua}}} * x_{\text{agua}} + C_{p_{\text{NaOH}}} * x_{\text{NaOH}}$$

$$C_{p_{mezcla}} = \left(3,107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) * (0,267) + \left(4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) * (0,679) + \left(1,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) * (0,054)$$

$$C_{p_{mezcla}} = 3,751 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Balance energético para calcular el calor que requiere la mezcla para alcanzar 120°C:

$$Q_{entregado} = Q_{absorbido} \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$Q_{entregado} = m_m * C_{p_{mezcla}} * (T_{fm} - T_{im}) + \lambda_{\text{evaporización}} * m_{H_2O} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Donde:

$$m_m = 1.473 \text{ g} = 1,473 \text{ kg} = \text{Masa de la mezcla (agua + NaOH + cáscara)}$$

$$T_{fm} = 120^\circ\text{C} = 393,15 \text{ K} = \text{Temperatura final de la mezcla}$$

$$T_{im} = 37^\circ\text{C} = 310,15 \text{ K} = \text{Temperatura inicial de la mezcla}$$

$$m_{H_2O} = 2.000 \text{ g} = 2 \text{ kg} = \text{Masa de agua en la base del autoclave}$$

$$Q_{entregado} = 1,473 \text{ kg} * 3,751 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (393,15 \text{ K} - 310,15 \text{ K}) + 2240,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 2 \text{ kg}$$

$$Q_{entregado} = 4939,793 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la etapa de cocción de la mezcla es 4939,793 kJ.

3.6.2.2 Balance de energía en el secado

El secado se realizó en el secador de tiro forzado (Ver Anexo V). Para determinar la cantidad de aire que se ocupa en el secador definimos el volumen de aire que ingresa:

$$\text{Volumen}_{\text{aire}} = \text{Ancho} * \text{Fondo} * \text{Alto} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde:

Ancho= 45,000 cm

Fondo= 37,500 cm

Alto= 35,500 cm

$$\text{Volúmen}_{\text{aire}} = 45,000 \text{ cm} * 37,500 \text{ cm} * 35,500 \text{ cm}$$

$$\text{Volúmen}_{\text{aire}} = 59.906,25 \text{ cm}^3 = 60,000 \text{ l} = 0,060 \text{ m}^3$$

Se mencionan la densidad del aire y su capacidad calorífica a 40°C de la tabla A-9 del libro “Mecánica de fluidos, fundamento y aplicaciones” (Cengel & Cimbala, 2005).

$$\rho_{\text{aire}} = 1,127 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p_{\text{aire}}} = 1,007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

A continuación, se define la masa de aire en el secador:

$$m_{\text{aire}} = \text{Volúmen}_{\text{aire}} * \rho_{\text{aire}} \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$m_{\text{aire}} = 0,060 \text{ m}^3 * 1,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{aire}} = 0,06762 \text{ kg} = 67,620 \text{ gr}$$

La entalpía de evaporización de agua saturada se saca de la tabla A-5 del libro “Termodinámica” (Cengel & Boles, 2006).

$$\lambda_{\text{evaporización}} = 2256,500 \text{ kJ/kg}$$

Balance energético:

$$Q_{\text{entregado}} = Q_{\text{absorbido}} \quad \text{Ec. 3.25}$$

$$Q_{\text{entregado}} = m_{\text{aire}} * C_{p_{\text{aire}}} * (T_{\text{fc}} - T_{\text{sist}}) + \lambda_{\text{evaporización}} * m_{\text{ch}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde:

$m_{ch} = 678 \text{ g} = 0,678 \text{ kg}$ = Masa de la pulpa de celulosa húmeda

$T_{ch} = 19^\circ\text{C} = 292,15 \text{ K}$ = Temperatura de la pulpa de celulosa húmeda

$T_{sist} = 40^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$ = Temperatura del sistema

$T_{fc} = 40^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$ = Temperatura final de la pulpa de celulosa

$$Q_{entregado} = 0,068 \text{ kg} * 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (313,15 \text{ K} - 313,15 \text{ K}) + 2256,5 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} * 0,678 \text{ kg}$$

$$Q_{entregado} = 1529,907 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la etapa de secado de la pulpa de celulosa es 1529,907 kJ.

A continuación, se define el calor necesario para calentar la pulpa de celulosa:

$$Cp_c = \frac{Q_{absorbido} - m_{aire} * Cp_{aire} * (T_{fc} - T_{sist})}{m_{ch} * (T_{fc} - T_{ch})} \quad \text{Ec. 3.27}$$

$$Cp_c = \frac{1529,907 \text{ kJ} - 0,068 \text{ kg} * 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (313,15 \text{ K} - 313,15 \text{ K})}{0,678 \text{ kg} * (313,15 \text{ K} - 292,15 \text{ K})}$$

$$Cp_c = 107,452 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

El calor necesario para calentar la pulpa de celulosa es 107,452 kJ/kg K.

3.6.2.3 Consumo de energía

La energía consumida se calcula en función de la potencia de cada equipo utilizado en la fase experimental. La fórmula para calcular la energía eléctrica es la siguiente:

$$E = P * t \quad \text{Ec. 3.28}$$

Donde:

E= Energía eléctrica consumida por el equipo (kWh)

P= Potencia eléctrica del equipo (kW)

t= Tiempo de funcionamiento del equipo (h)

Las características de cada equipo fueron obtenidas de sus placas de información. En la tabla III-9 se presenta la energía eléctrica consumida de los equipos utilizados.

Tabla III-9: Condiciones de operación de los equipos y costos de energía

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)
Balanza analítica	0,014	1	0,014
Licuada	0,4	0,017	0,007
Secador infrarrojos	0,4	2	0,8
Autoclave	2	4	8
Secador de tiro forzado	2	12	24

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.7 Determinación del rendimiento

Para determinar el rendimiento del proceso se toma en cuenta la relación de la cantidad de pulpa de celulosa en base seca obtenido entre la cantidad de cáscaras de maní.

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{masa de pulpa de celulosa obtenida}}{\text{masa de cáscara de maní}} * 100$$

Ec. 3.29

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{41,206 \text{ g}}{100,001 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = 41,206 \%$$

3.8 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) para realizar el análisis de datos con un tratamiento integrado.

3.8.1 Análisis de varianza univariante

Se realiza el análisis de varianza univariante para determinar la influencia de los factores de concentración de NaOH, tiempo y temperatura de cocción y sus interacciones sobre la variable respuesta del rendimiento de pulpa de celulosa seca.

3.8.1.1 Análisis de varianza univariante del rendimiento

En la tabla III-10 se muestran los datos introducidos al programa IBM SPSS.

Tabla III-10: Datos para el uso del programa IBM SPSS

Muestra	Variables independientes			Variable dependiente
	Concentración NaOH	Tiempo	Temperatura	Rendimiento base seca
M ₁₋₁	-1	-1	-1	31.2
M ₂₋₁	1	-1	-1	32.85
M ₃₋₁	-1	1	-1	41.21
M ₄₋₁	1	1	-1	30.85
M ₅₋₁	-1	-1	1	26.96
M ₆₋₁	1	-1	1	19.87
M ₇₋₁	-1	1	1	27.03
M ₈₋₁	1	1	1	21.11
M ₁₋₂	-1	-1	-1	31.95
M ₂₋₂	1	-1	-1	31.9
M ₃₋₂	-1	1	-1	40.56
M ₄₋₂	1	1	-1	35.17
M ₅₋₂	-1	-1	1	27.29
M ₆₋₂	1	-1	1	20.6
M ₇₋₂	-1	1	1	29.42
M ₈₋₂	1	1	1	18.28

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los factores inter-sujetos se muestran en la Tabla III-11 con la codificación de cada nivel para la determinación de variables significativas.

Tabla III-11: Factores inter-sujetos

Factores inter-sujetos		
		N
Concentración NaOH	-1,00	8
	1,00	8
Tiempo	-1,00	8
	1,00	8
Temperatura	-1,00	8
	1,00	8

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

En la tabla III-12 se muestra las pruebas inter-sujetos donde se observa si las variables y sus interacciones son significativas.

Tabla III-12: Pruebas inter-sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	672,785 ^a	6	112,131	33,814	0,000
Intersección	13587,691	1	13587,691	4097,515	0,000
ConcentNaOH	126,310	1	126,310	38,090	0,000
Tiempo	27,560	1	27,560	8,311	0,018
Temperatura	452,913	1	452,913	136,581	0,000
ConcentNaOH * Tiempo	26,566	1	26,566	8,011	0,020
ConcentNaOH * Temperatura	17,429	1	17,429	5,256	0,048
Tiempo * Temperatura	22,008	1	22,008	6,637	0,030
Error	29,845	9	3,316		
Total	14290,320	16			
Total corregido	702,630	15			
a. R al cuadrado = ,958 (R al cuadrado ajustada = ,929)					

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

Se puede observar que las variables concentración de NaOH, tiempo y temperatura, y sus interacciones de concentración de NaOH*tiempo, concentración de NaOH*temperatura y tiempo*temperatura, son significativas ya que poseen una significancia menor al 0,05 para un nivel de confianza del 95%.

3.8.2 Determinación del modelo matemático

Una vez identificadas las variables significativas, se realiza una regresión lineal para determinar el modelo matemático, mostrado en la tabla III-13.

Tabla III-13: Resumen del modelo matemático

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,979 ^a	0,958	0,929	1,82101
a. Predictores: (Constante), TiempoTemperatura, ConcentNaOHTemperatura, concentNaOHTiempo, Temperatura, Tiempo, ConcentNaOH				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

En la tabla III-14 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), donde se observa que el nivel de significancia tiende a cero indicando que el modelo matemático es correcto.

Tabla III-14: Resultado del análisis ANOVA

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	672,785	6	112,131	33,814	0,000 ^b
	Residuo	29,845	9	3,316		
	Total	702,630	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), TiempoTemperatura, ConcentNaOHTemperatura, concentNaOHTiempo, Temperatura, Tiempo, ConcentNaOH						

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

La tabla III-15 muestra los coeficientes del modelo matemático:

Tabla III-15: Coeficientes del modelo matemático

Coeficientes^a								
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados			95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	29,142	0,455		64,012	0,000	28,112	30,171
	ConcentNa OH	-2,810	0,455	-0,424	-6,172	0,000	-3,840	-1,780
	Tiempo	1,312	0,455	0,198	2,883	0,018	0,283	2,342
	Temperatura	-5,320	0,455	-0,803	-11,687	0,000	-6,350	-4,291
	ConcentNa OHTiempo	-1,289	0,455	-0,194	-2,830	0,020	-2,318	-0,259
	ConcentNa OHTemperatura	-1,044	0,455	-0,157	-2,293	0,048	-2,074	-0,014
	TiempoTemperatura	-1,173	0,455	-0,177	-2,576	0,030	-2,203	-0,143
b. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

De acuerdo al diseño factorial propuesto, se observa que todas las variables son significativas por poseer un nivel de significancia menor a 0,05. Con los valores numéricos de B se obtiene la ecuación de la regresión lineal para el rendimiento de pulpa de celulosa en base seca.

$$\text{Rendimiento} = 29,142 - 2,810 C + 1,312 t - 5,320 T - 1,289 C * t - 1,044 C * T - 1,173 t * T \quad \text{Ec. 3.30}$$

Donde:

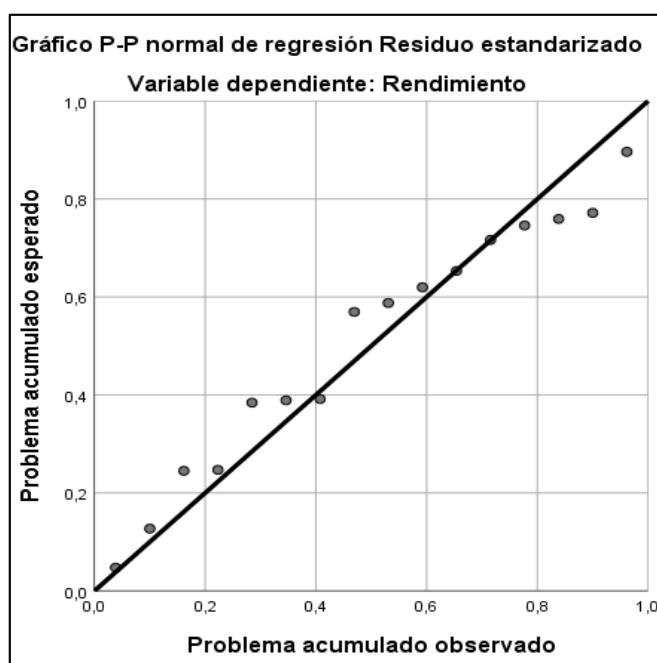
t = Tiempo

T = Temperatura

C = Concentración de NaOH

En la figura III-5 se muestra el modelo lineal, el cual indica la relación entre la variable dependiente y las variables independientes.

Figura III-5: Modelo lineal



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

Mediante los puntos se observa que algunas correlaciones no se ajustan al modelo, sin embargo, el análisis ANOVA no muestra gran significancia de ajuste, por lo que el modelo es correcto. Con la regresión lineal realizada se obtuvo nuevos datos de rendimiento de pulpa de celulosa en base seca, los cuales se encuentran en la siguiente tabla III-6.

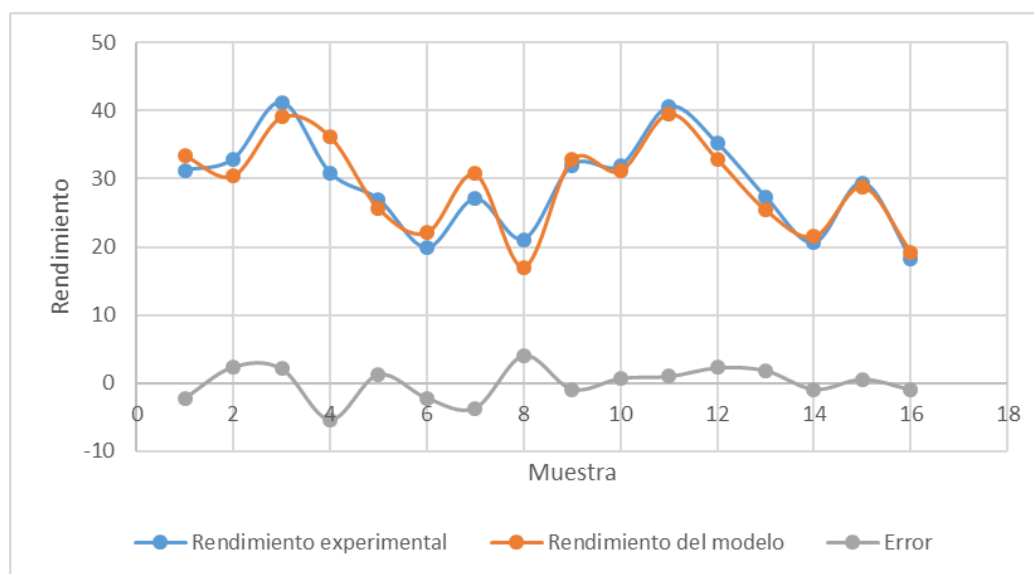
Tabla III-16: Comparación del rendimiento obtenido experimentalmente y la corrección del rendimiento obtenido por el programa SPSS

Muestra	Rendimiento experimental	Rendimiento del modelo	Error
M ₁₋₁	31.2	33.43	-2.23
M ₂₋₁	32.85	30.45	2.40
M ₃₋₁	41.21	39.07	2.14
M ₄₋₁	30.85	36.26	-5.41
M ₅₋₁	26.96	25.69	1.27
M ₆₋₁	19.87	22.08	-2.21
M ₇₋₁	27.03	30.72	-3.69
M ₈₋₁	21.11	17.03	4.08
M ₁₋₂	31.95	32.84	-0.89
M ₂₋₂	31.9	31.19	0.71
M ₃₋₂	40.56	39.57	0.99
M ₄₋₂	35.17	32.90	2.27
M ₅₋₂	27.29	25.44	1.85
M ₆₋₂	20.6	21.52	-0.92
M ₇₋₂	29.42	28.86	0.56
M ₈₋₂	18.28	19.24	-0.96

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los datos de rendimiento obtenidos experimentalmente y los obtenidos por el programa SPSS se grafican a continuación en la figura III-11 para verificar el ajuste de la ecuación del modelo matemático.

Figura III-6: Rendimiento experimental vs Rendimiento del modelo vs Error



Fuente: Elaboración propia, 2025.

CAPÍTULO IV

COSTOS DEL PROYECTO

4.COSTOS DEL PROYECTO

4.1 Evaluación de costos

Para determinar el presupuesto del proyecto de investigación, se realizó la evaluación de costos de los gastos que se realizaron en la elaboración del estudio del proyecto.

Tabla IV-1: Detalle de costos de materia prima y reactivos utilizados en la parte experimental en la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cáscara de maní	2	kg	0,8	1,6
2	Hidróxido de sodio	2	kg	40	80
3	Agua destilada	10	l	4	40
4	Agua purificada	40	l	0,85	34
5	Hipoclorito de sodio	40	l	11,25	450
Total					605,6

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-2: Detalle de costos de materiales adquiridos en la parte experimental del proceso de obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Taper de plástico 5 l.	2	pza.	30	60
2	Colador plástico malla fina	1	pza.	25	25
3	Balde de plástico	2	pza.	20	40

4	Taper de plástico 1,5 l.	1	pza.	3.5	3.5
5	Jarra de plástico de 0,5 l.	1	pza.	5	5
6	Bowl de acero inoxidable 2 l.	1	pza.	65	65
7	Bowl de acero inoxidable 1,5 l.	1	pza.	45	45
8	Espátula de acero inoxidable	1	pza.	20	20
9	Vaso de precipitado 1 l.	1	pza.	105	105
10	Varilla de laboratorio	1	pza.	21	21
11	Tela gasa	2	m	8	16
12	Moldes de madera	2	pza.	15	30
13	Barbijo quirúrgico	20	pza.	1	20
14	Guantes quirúrgicos	20	par	2	40
15	Tablas	4	pza.	5	20
Total					555,5

Fuente: Elaboración propia,2025.

El resto de materiales para realizar el estudio fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla IV-3: Detalle de costos de análisis fisicoquímicos

N°	Detalle	Cantidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cenizas	1	28	28
2	Humedad	1	16	16
3	Alfa-celulosa	1	840	840
4	Lignina	1	315	315
Total				1.199

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo de los análisis de cenizas y humedad tuvieron un descuento del 60% del precio real por un convenio de la Facultad de Ciencias y Tecnología con el CEANID.

Tabla IV-4: Detalle de costos de material de apoyo

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Investigación internet	4	Mes	170	680
2	Impresión	650	Hoja	0.3	195
3	Anillados	6	Anillado	6	36
4	Empastado	3	Empastado	65	195
5	Transporte diario	320	Pasaje	1	320
Total					1.426

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para los costos de energía de los equipos utilizados se consideró que, en la ciudad de Tarija, el costo promedio de energía eléctrica es de 0,79 Bs./kWh.

Tabla IV-5: Detalle de costos de energía en equipos utilizados

N°	Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo (Bs.)
1	Balanza analítica	0,014	5	0,07	0,055
2	Licuada	0,4	1	0,400	0,316
3	Secador infrarrojos	0,4	5	2	1,580
4	Autoclave	2	80	160	126,400
5	Secador de tiro forzado	2	240	480	379,200
	Total				507,551

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Considerando la mano de obra empleada para llevar a cabo el proyecto se designó un costo de mano de obra de 1.000 Bs por mes, ya que el proyecto se llevó a cabo en un periodo de 5 meses, el costo de mano de obra del proyecto es de 5.000 Bs.

Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio

N°	Descripción	Costo (Bs.)
1	Costo de materia prima y reactivos	605,6
2	Costo de materiales adquiridos	555,5
3	Costo de análisis fisicoquímicos	1.199
4	Costo de material de apoyo	1.426
5	Costo de energía de equipos	507,551
6	Costo de mano de obra	5.000
Total		9.293,651

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo total del proyecto de investigación es de 9.293,651 Bs.

4.2 Costo de producción

A partir del balance de materia y energía y el gasto energético de los equipos utilizados, se estima el costo de producción para la obtención de pulpa de celulosa a partir de la cáscara de maní (*Arachis hypogaea* L.) procedente de la comunidad de Sachapera, ubicada en el municipio de Yacuiba del departamento de Tarija.

El costo de producción se realiza para el mejor experimento obtenido en el diseño experimental, el cual tiene las variables en la etapa de cocción de las cáscaras de concentración de NaOH al 8%, tiempo de cocción de 90 min y temperatura de cocción de 120°C para obtener pulpa de celulosa en base seca.

Los costos fijos asociados al servicio básico de energía eléctrica de 0,79 Bs./kWh.

Tabla IV-7: Detalle de costos del proceso de obtención

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cáscara de maní	0,1	kg	0,8	0,08
2	Hidróxido de sodio	0,08	kg	40	3,2
3	Agua destilada	1	l	4	4
4	Agua purificada	0,3	l	0,85	0,255
5	Hipoclorito de sodio	1	l	11,25	11,25
Total					18,785

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-8: Detalle de costos de energía en los equipos utilizados

N°	Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo (Bs.)
1	Balanza analítica	0,014	1	0,014	0,011
2	Licuada	0,4	0,017	0,0068	0,005
3	Secador infrarrojos	0,4	1	0,4	0,316
4	Autoclave	2	4	8	6,32
5	Secador de tiro forzado	2	12	24	18,96
	Total				25,612

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para costos de mano de obra se designa 10 Bs por hora, considerando que por el experimento se ocupa un tiempo de 18 horas, el costo de mano de obra es de 180 Bs.

El costo total de producción es la suma de los costos del proceso de obtención, el consumo energético de los equipos utilizados y la mano de obra empleada.

$$\text{Costo total} = 18,785 \text{ Bs.} + 25,612 \text{ Bs.} + 180 \text{ Bs.} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$\text{Costo total} = 224,397 \text{ Bs} / 41,206 \text{ g de pulpa de celulosa en base seca}$$

Para la producción de 41,206 g de pulpa de celulosa en base seca a partir de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.), procedente de la comunidad de Sachapera, ubicada en el municipio de Yacuiba del departamento de Tarija, se tiene un costo de 224,397 Bs. (Redondeado a 224,5 Bs).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Finalizando el proyecto de investigación, según objetivos planteados, se concluye que:

- Se obtuvo la caracterización de la cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.): humedad 8,67%, cenizas 3,16%, celulosa 42,62%, lignina 34,0% y extractivos 3,0%, siendo los fundamentales para la obtención de pulpa de celulosa.
- Se logró realizar el diseño experimental para la obtención de pulpa de celulosa a escala laboratorio a partir de 100,001 g de cáscara de maní bayo (*Arachis hypogaea* L.) mediante el proceso a la sosa, para obtener 41,206 g de pulpa de celulosa en base seca.
- Se caracterizó la pulpa de celulosa obtenida para determinar su calidad mediante el contenido de alfa-celulosa dando como resultado 42,2% de la cantidad total de celulosa, debido a que para papeles de alta calidad se necesitan porcentajes superiores al 80%, puede emplearse en usos menos exigentes como cartón o papeles marrones. El contenido de lignina dio como resultado 4,36%, ya que para papeles de alta calidad se requieren porcentajes inferiores al 1%, puede emplearse para cartón o papeles marrones como bolsas de papel.
- Se determinó el rendimiento del proceso experimental dando un resultado de 41,206%, valor que se encuentra dentro del rango del rendimiento teórico de producción de pulpa de celulosa a partir de residuos agrícolas, el cual se obtuvo con el mejor diseño experimental sometiendo la materia prima a una cocción alcalina bajo condiciones de 8% de hidróxido de sodio, un tiempo de 90 minutos y una temperatura de 120°C.
- Se determinó el costo total del proyecto de investigación financiándose en un valor de 9.293,651 Bs, este valor incluye el costo de materia prima, reactivos, materiales, análisis, energía de equipos utilizados y mano de obra. Por otra parte, el costo de producción fue de 224,5 Bs para la obtención de 41,206 g de pulpa de celulosa en base seca, esto incluye costos de proceso y mano de obra.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Investigar la pulpa de celulosa en base seca obtenida para la fabricación de papel tipo sábana ya que al disolverse presenta delgadez, suavidad y flexibilidad.
- Seleccionar sólo cáscaras y no la prolongación del tallo de la planta ya que no contiene fibras de celulosa y es una interferencia en el proceso.
- Trabajar a condiciones de operación inferiores a las utilizadas en la industria de papel y celulosa a partir de fuentes madereras ya que la madera es más dura y compacta por la lignina que refuerza la rigidez.
- Explorar aditivos para añadir al proceso y aumentar la resistencia en la pulpa de celulosa obtenida, un aditivo a explorar es el almidón ya que se usa ampliamente en la fabricación de papel actuando como agente aglutinante y de resistencia.
- Explorar el proceso de recuperación de reactivos producidos en el licor negro generado para eliminar este agente contaminante y aprovechar los reactivos recuperados, como NaOH, reutilizándolo en el proceso de obtención de pulpa de celulosa y disminuyendo los costos de compra de reactivos.
- Debido a los resultados óptimos obtenidos, se recomienda utilizar el presente proyecto como base para poder obtener papel, se sugiere papel tipo sábana, el cual puede ser más útil.