

**PROYECTO: DESARROLLO DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE RESIDUOS DE  
CÁSCARA DE ZAPOTE A NIVEL LABORATORIO**

**KAREN SOFIA ARIAS CANDIA**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**DIRECTOR**

**DANY JOSÉ CÁRDENAS ROMAY**

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2025**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. febrero de 2025

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Consejero Institucional

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica

**Dra. María Fernanda Vega de Mendoza**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo**

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

**Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo**

Secretario general

**Dr. José Luis Macías Rodríguez**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Dr. Carlos Mauricio Veloza Villamil**

Directora del Programa

**Dra. María Angélica Acosta Pérez**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## **DEDICATORIA**

Quiero comenzar este trabajo con una profunda gratitud hacia Dios, fuente de toda sabiduría, fortaleza y guía. Gracias por brindarme la serenidad para enfrentar cada desafío y por estar a mi lado en todo momento, dándome la confianza necesaria para seguir adelante.

A mis padres, por su amor incondicional, su sacrificio y su constante apoyo. Gracias por ser el pilar de mi vida, por siempre creer en mí y por brindarme las herramientas necesarias para lograr mis metas.

A mi hermano, por su apoyo inquebrantable y su amor fraternal. Gracias por siempre estar ahí, motivándome y brindándome su ayuda incondicional.

A mi novio, por su comprensión, paciencia y amor. Gracias por ser mi compañero de vida, por tu constante apoyo emocional y por ser mi fortaleza en cada paso de este camino.

Y finalmente, a mi hermanita Victoria, por ser mi fuente de alegría y mi inspiración diaria. Gracias por tu amor puro y tu luz, que me motiva a seguir adelante con todo lo que emprendo. Este logro es también para ti, mi pequeña.

Este trabajo es el reflejo del apoyo y amor de todas estas personas, que con su presencia en mi vida, han hecho posible este logro. ¡Gracias de corazón!

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, con su apoyo y dedicación, han sido fundamentales en la realización de esta tesis.

A mi profesor Dany José Cárdenas Romay, por su orientación experta, su compromiso y paciencia. Gracias por brindarme su conocimiento y por guiarme a lo largo de este proceso con gran profesionalismo, impulsándome siempre a dar lo mejor de mí.

A mis padres, por su amor incondicional, sacrificios y apoyo constante. Gracias por siempre creer en mí, por ser mi principal fuente de motivación y por haberme dado las bases para alcanzar este logro.

A mi hermano, por su constante apoyo emocional, por brindarme su confianza y por ser un ejemplo de perseverancia y determinación. Gracias por siempre estar presente en los momentos más importantes.

A mi novio Sebastián, por su comprensión, paciencia y amor. Gracias por estar a mi lado, por ser mi fuente de calma y motivación, y por ser un pilar fundamental durante todo este proceso.

A todos ustedes, este logro también es suyo. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible. ¡Gracias de corazón!

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	17
1. GENERALIDADES	18
1.1 Generalidad del zapote	18
1.1.1 Taxonomía	18
1.1.2 Morfología	19
1.1.3 Ecosistema de crecimiento	21
1.1.4 Descripción del fruto	21
1.2 Generalidades de bioplásticos	22
1.2.1 Tipos de bioplástico	23
1.3 Los carbohidratos	26
1.3.1 Polisacáridos	27
1.3.2 Almidón	28
1.3.3 Celulosa	29
1.3.4 Hemicelulosa	30
1.3.5 Lignina	31
1.4 Obtención de pulpa de celulosa	32
1.4.1 Celulosa química	32
1.4.2 Celulosa mecánica	33
1.5 Generalidades del pretratamiento	34
1.5.1 Pretratamiento físicos	34
1.5.2 Pretratamiento físico-químico	34

1.5.3	Pretratamientos químicos	36
1.5.4	Pretratamiento biológico	37
1.6	Generalidades de hidrólisis	38
1.6.1	Hidrólisis con ácido concentrado	39
1.6.2	Hidrólisis con ácidos diluidos	39
1.6.3	Hidrólisis alcalina	40
1.6.4	Hidrólisis enzimática	40
1.7	Caracterización del bioplástico	40
1.7.1	Espesor	41
1.7.2	Permeabilidad de vapor de agua	41
1.7.3	Sostenibilidad de agua	42
1.7.4	Módulo de elasticidad	43
1.7.5	Fuerza de tracción	45
1.7.6	Deformación de ruptura	45
1.7.7	Biodegradabilidad	46
2.	IDENTIFICACIÓN DEL MÉTODO MAS APROPIADO PARA LA REALIZACIÓN DEL BIOPLÁSTICO	48
2.1	Selección del pretratamiento	49
2.2	Selección de modificación de celulosa	60
3.	ELABORAR EL BIOPLÁSTICO A ESCALA LABORATORIO A PARTIR DE LA SELECCIÓN DEL PROCESO MÁS APROPIADO	71
3.1	Modificación de la cáscara de zapote	71
4.	CARACTERIZAR EL BIOPLÁSTICO ELABORADO A PARTIR DE LA CÁSCARA DEL ZAPOTE VALIDANDO SU APLICABILIDAD	85
4.1	Prueba visual de la celulosa obtenida	85
4.2	Prueba del espesor	86

4.3	Prueba de humedad	87
4.4	Prueba de solubilidad	88
4.5	Prueba de permeabilidad	89
4.6	Prueba de tracción y elongación	91
4.7	Biodegradabilidad	93
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
6.	CONCLUSIONES	100
	RECOMENDACIONES	101
	REFERENCIAS	102
	ANEXOS	111

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Representación general del fruto zapote</i>	18
Figura 2 <i>Morfología del zapote</i>	21
Figura 3 <i>Descripción del fruto</i>	22
Figura 4 <i>Clasificación de los materiales de los bioplásticos</i>	25
Figura 5 <i>Material biológico para elaborar bioplástico</i>	27
Figura 6 <i>Esquema de la ramificación de un polímero de glucosa</i>	28
Figura 7 <i>Estructura química de la celulosa</i>	30
Figura 8 <i>Estructura química de la celulosa</i>	31
Figura 9 <i>Estructura química de la lignina</i>	32
Figura 10 <i>Procedimientos de extracción química de celulosa</i>	33
Figura 11 <i>Las reacciones de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa</i>	38
Figura 12 <i>Curva de la resistencia de tensión vs deformación</i>	44
Figura 13 <i>Curva de fuerza vs distancia obtenida en la prueba de perforación</i>	46
Figura 14 <i>Proceso de extracción de celulosa</i>	59
Figura 15 <i>Procedimiento previo al pretratamiento</i>	72
Figura 16 <i>Modificación mecánica por medio de la reducción</i>	73
Figura 17 <i>Proceso de hidrólisis alcalina</i>	74
Figura 18 <i>Proceso de filtración</i>	75
Figura 19 <i>Proceso de secado</i>	76
Figura 20 <i>Proceso de la hidrólisis ácida</i>	76
Figura 21 <i>Proceso de filtración</i>	77
Figura 22 <i>Proceso de cloración</i>	78
Figura 23 <i>Proceso de filtración</i>	78
Figura 24 <i>Proceso de hidrolisis alcalina</i>	79
Figura 25 <i>Proceso de hidrolisis alcalina</i>	80
Figura 26 <i>Celulosa obtenida del blanqueamiento</i>	80
Figura 27 <i>Secado celulosa</i>	81
Figura 28 <i>Proceso de pesado</i>	81

Figura 29 <i>Montaje de plancha de agitación.</i>	82
Figura 30 <i>Proceso de agitación</i>	83
Figura 31 <i>Lamina de acetato de celulosa</i>	84
Figura 32 <i>Prueba visual de la celulosa</i>	85
Figura 33 <i>Prueba de solubilidad</i>	88
Figura 34 <i>Permeabilidad vs Tiempo</i>	90
Figura 35 <i>Equipo para ensayo de atracción</i>	92
Figura 36 <i>Prueba de biodegradabilidad</i>	94
Figura 37 <i>Bioplástico en descomposición.</i>	95
Figura 38 <i>Probetas</i>	112

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Clasificación taxonómica del zapote (Matisia Cordata)</i>	19
Tabla 2 Clasificación de los carbohidratos	26
Tabla 3 <i>Ventajas y desventajas de los pretratamientos</i>	50
Tabla 4 <i>Matriz de selección de valores ponderados</i>	57
Tabla 5 <i>Métodos para elaborar bioplástico</i>	61
Tabla 6 <i>Matriz de selección de valores ponderados</i>	69
Tabla 7 Prueba de espesor	86
Tabla 8 <i>Prueba de humedad</i>	87
Tabla 9 Prueba de solubilidad	88
Tabla 10 <i>Prueba de permeabilidad</i>	90
Tabla 11 <i>Prueba de tracción</i>	92
Tabla 12 <i>Porcentaje de biodegradabilidad</i>	95
Tabla 13 <i>Datos para la prueba de permeabilidad de vapor</i>	114
Tabla 14 <i>Datos para calcula la prueba de módulo de elasticidad</i>	115
Tabla 15 <i>Balance de masa de la acetilacion</i>	117
Tabla 16 <i>Balance da masa del bioplástico</i>	119

## RESUMEN

El presente trabajo de grado se enfoca en la obtención de un bioplástico utilizando cáscara de zapote como materia prima, residuo agroindustrial rico en celulosa. La finalidad fue desarrollar un material biodegradable que puede ser una alternativa sostenible a el plástico convencionales. Para ello, se analizaron diversos procesos de extracción de celulosa y obtención de bioplástico reportados en estudios de investigación , identificando las ventajas y desventajas de cada método. Mediante la táctica de matriz de selección de factores ponderados y criterios específicos, se evaluaron estos procesos para seleccionar los métodos más adecuados. Los proceso seleccionados se dividieron en dos etapas principales : En la primera etapa se realizó la hidrólisis ácida con el objetivo de extraer la celulosa, sometiendo a la cascara a ácido clorhídrico al 98% y en la segunda, se realiza la modificación de la celulosa mediante un proceso de acetilación, el cual implica la utilización de ácido acético, anhídrido de acetato y un catalizador de ácido sulfúrico para producir el bioplástico (acetato de celulosa).

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización fueron comparados con algunos plástico convencional y bioplásticos a partir de cascara de diferentes frutas. Se obtuvo un bioplástico de 7,68 g con una humedad del 37,98 %, solubilidad del 51,11 %, y una permeabilidad al vapor de agua de 0,00245 g/h·m·MPa, lo cual proporciona indicios sobre su estabilidad en medios húmedos y su capacidad de control de vapor. Por otra parte en cuanto a las propiedades mecánicas, el bioplástico presentó un módulo de elasticidad de 22,89 MPa, fuerza de tracción de 2,55 MPa y una deformación a la ruptura del 43,31 %, valores que indican una buena ductilidad y una resistencia moderada al estiramiento antes de la fractura.Los resultados obtenidos son prometedores a partir de la comparación realizada para aplicaciones en empaques biodegradables y recubrimientos, debido a sus propiedades químicas y físicas.

**Palabras claves:** Bioplástico , Caracterización , Cascara De Zapote , Celulosa , Hidrólisis Ácida , Acetilación .

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia se emplean diversas variedades de frutas para la elaboración de productos en múltiples industrias, como la farmacéutica, cosmética, alimenticia y química, entre otras. Colombia sigue un modelo económico lineal, donde la extracción de recursos es su actividad principal y primordial. Este enfoque implica la preparación de productos para su posterior comercialización y consumo, seguido por el descarte de dichos productos una vez que han cumplido su vida útil, son enviados a rellenos sanitarios o botaderos. Según datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) de Colombia para el año 2023, los alimentos que presentaron mayores índices de desperdicio fueron las frutas y verduras, con un porcentaje alarmante del 62 %, lo que equivale a 6,1 millones de toneladas. Le siguen en proporción los desperdicios de raíces y tubérculos, alcanzando un 25 %, lo que se traduce en 2,4 millones de toneladas [1].

En cuanto a las etapas de la cadena alimentaria, se identifica que la producción agrícola para el 2023 es el eslabón principal responsable de la pérdida de alimentos, con un 40.5% del total. La distribución y el retail representan un 20,6 %, seguidos por la post-cosecha y almacenamiento con un 19,8 %. Por su parte, el consumo contribuye con un 15,6 % y el procesamiento industrial con un 3,5 % [1]. Estas cifras evidencian la necesidad urgente de implementar medidas que promuevan una economía circular y sostenible en Colombia, donde se reduzca significativamente el desperdicio de alimentos en todas las etapas de la cadena de suministro y se fomente la reutilización y el reciclaje de residuos para minimizar el impacto ambiental y económico asociado con la producción y el consumo de alimentos.

Según la investigación realizada por D. K. Jurado-Erazo, Y. A. Tulcán-Cuasapud, y A. F. Rojas González (2023), menciona que los residuos de las frutas secas equivalen a un 50 %, constituidos por cáscaras, semillas, pulpa, membranas, hojas, pedúnculos, bagazos, etc [2]. Por ende, durante la producción de zapote uno de los mayor subproducto obtenido es la cáscara. Actualmente se evalúan las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos [2], pero hasta el momento solo una pequeña parte son reutilizados y destinados para el alimentos de animales y abonos agrícolas. Estos residuos tienen un gran potencial a futuro por ende se busca incentivar una economía circular y disminuir los efectos invernaderos por la emisión de CO<sub>2</sub>. La cáscara de zapote cuenta con un

gran auge por el hecho de que presenta características químicas únicas, tales como los compuestos biopolímeros valiosos para la elaboración de un bioplásticos de alta calidad [2].

Por otra parte, el plástico derivado del petróleo es una amenaza enorme para el medio ambiente, el cual se debe mitigar debido a que su proceso de degradación es lento y no es completo dejando partículas residuales en el aire que terminan llegando a los suelos, cuerpos de agua e incluso a los seres vivos del ecosistema [3].

Al sintetizar un bioplástico a partir de fuentes renovables, como la cáscara de zapote, se busca otorgar propiedades biodegradables y compostables, es decir, que se descomponga de manera natural en el medio ambiente, con el fin de reducir la acumulación de residuos plásticos y emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez contribuiría a la mitigación del cambio climático.

Se espera que este material funcione como abono orgánico (compost), permitiendo cerrar el ciclo de vida de los productos y contribuyendo a la reducción de residuos. Al final de su vida útil, este material se convierte en nutrientes para el suelo, promoviendo un ciclo de vida circular del producto en lugar de terminar en un vertedero o como contaminante ambiental. El uso de estos subproductos al llegar a ser valorizados puede proporcionar ingresos adicionales a los campesinos o agricultores e incentivándolos a la producción y consumo sostenible [3].

Dependiendo del bioplástico obtenido de la cáscara de zapote, es posible lograr una caracterización de sus propiedades físicas y químicas. A partir de esta caracterización, se evalúan y se definen las aplicaciones para las diversas industrias. Estas aplicaciones incluyen desde embalajes compostables para el sector alimenticio hasta materiales utilizados en la industria textil o incluso en la construcción [2].

Al empezar a utilizar los residuos orgánicos como materias primas en diferentes procesos (bioplástico) se puede llegar a alargar la vida útil de este relleno sanitario. Por otra parte, los residuos presentes en estos rellenos sanitarios generalmente se descomponen de manera anaeróbica produciendo emisiones de gases de efecto invernadero, como metano, y lixiviados contaminantes que pueden filtrarse hacia el suelo y las aguas subterráneas, contribuyendo así a la contaminación ambiental. En el área de salud pública la acumulación de estos desechos genera condiciones insalubres, plagas y diversas enfermedades respiratorias y bacterianas [4].

La falta de aprovechamiento de los desechos orgánicos representa una pérdida significativa de oportunidades, como la recuperación y reutilización de los nutrientes compuestos valiosos para la industria. Esto no solo implica el desperdicio de recursos con potencial para la generación de bioplásticos, sino también la pérdida de ingresos adicionales derivados de la valorización de estos residuos. Además, se desaprovecha la posibilidad de contribuir a la reducción del consumo de plásticos convencionales, promoviendo alternativas más sostenibles y ambientalmente responsables.

A continuación, se presentan los objetivos trazados en la investigación

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Desarrollar a escala laboratorio un bioplástico biodegradable a partir de la cáscara del zapote como una alternativa sostenible

### **Objetivos específicos**

- Identificar el método más apropiado para la producción de bioplástico mediante la extracción de los componentes biopolímeros de la cáscara de zapote.
- Elaborar el bioplástico a escala laboratorio a partir de la selección del proceso más apropiado.
- Caracterizar el bioplástico elaborado a partir de la cáscara del zapote validando su aplicabilidad.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Generalidad del zapote

El zapote (*Matisia cordata*) conocido en Colombia también como zapote común, es originario de la Amazonia Brasileira, su distribución abarca a Brasil, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela. En Colombia se encuentra en los valles de los ríos Cauca y Magdalena, así como en los llanos orientales [5].

#### Figura 1

*Representación general del fruto zapote*



**Nota.** La figura 1 representa el fruto de zapote. Tomado de : A.Mejia, "tropical Fruta – zapote *Matisia cordata* Foto Pro "vecteezy", [<https://es.vecteezy.com/foto/24709960-tropical-fruta-zapote-matisia-cordata>]. Accedido: agosto,21, 2024.

#### 1.1.1 Taxonomía

A continuación, en la Tabla 1 se presenta la clasificación taxonómica del fruto *Matisia cordata*, conocido comúnmente como zapote. la tabla 1 incluye los principales niveles jerárquicos que describen su posición dentro del reino vegetal.

**Tabla 1***Clasificación taxonómica del zapote (Matisia Cordata)*

<b>NOMBRE COMÚN</b>	Chupa chupa, sapotillo de peru ,sapote sudamericano
<b>NOMBRE CIENTÍFICO</b>	Matisia cordata bonpl
<b>REINO</b>	Plantae
<b>DIVISIÓN</b>	Magnoliophyta
<b>CLASE</b>	Magnoliopsida
<b>ORDEN</b>	Malvales
<b>FAMILIA</b>	Malvaceae
<b>GÉNERO</b>	Quararibea
<b>ESPECIE</b>	Quararibea cordata
<b>SINONIMIA</b>	Matisia cordata Bonpl quararibea cordata(Bonpl)
<b>AUTOR</b>	(Bonpl.) Vischer

*Nota.* En la tabla 1 se muestra la taxonomía del zapote Tomado de: Morales L. y Varón T. “Árboles Ornamentales en el Valle de Aburrá”,catálogo digital de flora del valle de aburra,[<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/56>], accedido agosto,21,2024.

### **1.1.2 Morfología**

El árbol de zapote (*Matisia cordata*) puede alcanzar alturas que oscilan entre los 12 y 15 metros. Su fruto tiene forma globosa u ovoide, con dimensiones que varían entre 7 y 15 cm de largo y un diámetro de 5 a 15 cm. La cáscara presenta un color marrón verdoso y una composición que incluye un 86,88 % de agua, 0,09 % de grasa, 1,33 % de proteínas, 2,07 % de fibra y 9,31 % de carbohidratos. De estos últimos, se aprovecharán los carbohidratos debido a su contenido de celulosa.

El fruto contiene de cuatro a cinco semillas cuneiformes, con un tamaño que oscila entre 2 y 5 cm de longitud y 2 a 3 cm de ancho. Su pulpa, de un color naranja intenso, es fibrosa, dulce, aromática y puede representar hasta un 80 % del peso total del fruto maduro [5],[7].

- Hojas

Son largamente pecioladas, semi-caducas, alternas, agrupadas en rosetas cerca de los extremos de las ramas, son en gran medida en forma de corazón [7], los peciolo de 1,0 - 1,5 cm de longitud, pulvinulados, las láminas de 15 - 25 cm de longitud y 15 - 25 cm de ancho, ampliamente acorazonadas, el ápice obtuso, vagamente acuminado, la base cordada, la nervación palmeada, los nervios 7 - 9, las láminas glabras o glabradas [8].

- Flores

Constan de 6,5 -7,5 cm de longitud, hermafroditas, actinomorfas, con cáliz y corola presentes, el pedicelo de 2 - 3 cm de longitud, el cáliz cupuliforme, usualmente 5-dentado, fina y densamente pubescente en el exterior, los pétalos 5, color blanco o crema, de 1.5-2.5 cm de longitud, densamente afelpado - pubescentes en el exterior, el androceo con los filamentos de los estambres unidos formando un tubo estaminal de unos 3.0 -3.5 cm de longitud que sobrepasa la corola, liberado luego en 5 filamentos sobre los cuales se hallan las anteras numerosas y congestionadas; pistilo con ovario súpero, estilo columnar y estigma capitado, exserto del tubo estaminal [8].

- Frutos

globosos a subglobosos de 5-6 cm de longitud en los individuos silvestres, en variedades cultivadas hasta 10 cm de longitud, la superficie lisa, color marrón amarillento, con 5 surcos, cuenta con cinco semillas cuneiformes de 2 a 4 cm cada una [9],[10], un exocarpio o cascara gruesa, coriáceo [8].

La composición del zapote presenta fibras, calcio, fósforo, hierro, vitaminas A, B y C, entre otros nutrientes. En su valor nutricional se tiene en 100 gramos de parte comestible: Energía 73 Kcal, grasa 0.3 gr, carbohidratos 18,8 gr, fibra 0.9 gr, calcio 22.0 mg y fósforo 17.0 mg [10].

A continuación, en la Figura 2, se representa de manera visual la morfología del fruto de zapote (*Matisia cordata*). En esta ilustración se pueden observar el árbol en su estado natural, las hojas que lo caracterizan y los frutos en las etapas iniciales de su desarrollo.

## Figura 2

### *Morfología del zapote*



**Nota.** En las figura 2 se muestran la morfología del fruto la cual incluye el tronco, hojas, frutos Tomado de: Morales L. y Varón T. “Árboles Ornamentales en el Valle de Aburrá”,catálogo digital de flora del valle de aburra,[<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/56>], accedido agosto,21,2024.

### **1.1.3 Ecosistema de crecimiento**

El frut de zapote en cuanto al ecosistema que favorece su crecimientos, según la investigación realiza por Gloria Ortiz [7] posee la capacidad de adaptarse de manera sencilla a los climas y subtropical existentes en los pies de montes amazónicos siempre y cuando no existan heladas, tolera suelos con inundaciones ocasionales, pero crece mejor en suelos profundos con buen drenaje y buen contenido de materia orgánica. Crece en zonas con lluvias en el rango de 1500 a más de 4000 mm al año y una altitud de 460 - 750 msnm en los departamentos de toda la amazonia peruana. Las condiciones ambientales adaptativas son: temperatura media anual máxima de 25.1 °C y temperatura media anual mínima de 17.2 °C. Al haber una ligera defoliación de la copa, sus frutos son grandes, carnosos y muy comestibles, maduran en cuatro a cinco meses, es preferida por los animales silvestres; contribuyendo a la dispersión de las semillas [7].

### **1.1.4 Descripción del fruto**

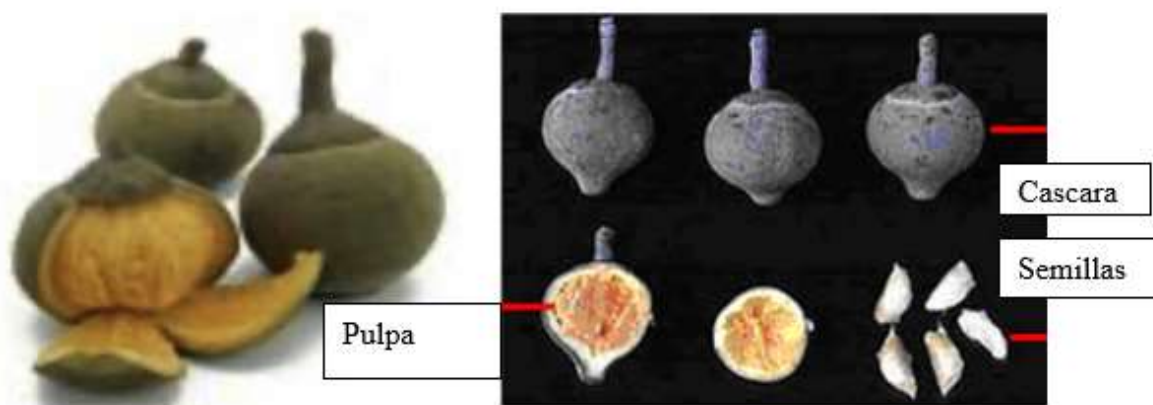
El fruto es baccaceo, con cáliz persistente, globoso, cónico, redondeado u ovoide, de 7 a 22 cm de largo y 5 a 15 cm de diámetro; epicarpio grueso, coriáceo pardo verduzco a pardo amarillento, pulverulento; mesocarpio jugoso, fibroso, anaranjado, aromático, dulce y de sabor agradable;

semillas cuneiformes en número de 3 a 5, de 4 a 5 cm de longitud y 2 a 3 cm de ancho, cubierto por fibras que atraviesan el mesocarpio [5].

A continuación, en la Figura 3, se presenta una ilustración detallada del fruto de zapote (*Matisia cordata*), que permite visualizar la descripción del fruto y las partes que lo componen. La representación cuenta con elementos clave como la cáscara externa, las semillas y la pulpa.

### Figura 3

#### *Descripción del fruto*



**Nota.** La figura 3 representa el fruto de zapote con sus respectivas partes. G. A. S. Ortiz, Evaluación de la calidad de la fibra de los subproductos del fruto del zapote (*Matisia cordata*) y su aplicación en la elaboración de producto fibroso, Universidad de Cauca, 2006.

## 1.2 Generalidades de bioplásticos

El bioplástico se define según la asociación europea “european bioplastics” en el 2023 [11] como un materia que puede ser biobasados , biodegradables o ambas. El termino biobasado o de origen biológico hace referencia a la parte del material o producto que es derivado de biomasas. Al ser de origen biológico se debe indicar de manera clara la unidad de contenido de carbono de origen biológico o contenido de masa biológica expresándose en porcentaje y el método de medición debe ser claramente establecido.

La biodegradabilidad es una propiedad inherente de ciertos polímeros que puede ser conveniente para una aplicación especificación. La biodegradabilidad es un proceso químico en donde el material, con la ayuda de microorganismo son metabolizado en agua, dióxido de carbono y biomasa. Cuando los materiales se biodegradan en las condiciones y plazos definidos por la norma

europea de compostaje industrial EN 13432, se pueden certificar y etiquetar como compostables industrialmente [11].

Por lo tanto para clasificarse como un bioplástico deben cumplir con estas características, proceder de una fuente natural y renovable o degradarse con facilidad en la naturaleza.

Los bioplásticos presentan características similares a las de los plásticos convencionales, lo que los hace útiles en diversas aplicaciones. Sin embargo, pueden tener algunas limitaciones, como menor rigidez o resistencia al calor, dependiendo del tipo de bioplástico utilizado. Estas limitaciones varían según la composición y el proceso de fabricación [13].

Una de las ventajas de los bioplásticos es su capacidad para reducir la huella de carbono, gracias al uso de fuentes renovables y procesos de producción más sostenibles, disminuyendo el uso de recursos fósiles. Además, suelen requerir menor consumo de energía eléctrica en su elaboración, lo que contribuye a disminuir los costos de producción y hace de ellos una alternativa más ecológica y económicamente viable. Según la asociación de european bioplastic (2023)[11]. El mercado actual de bioplásticos se caracteriza por un ritmo de crecimiento dinámico y una fuerte diversificación [13].

Otra de las ventajas con la que cuentan los bioplásticos es su completa biodegradabilidad, destacan significativamente sobre los plásticos convencionales debido a su capacidad de descomposición en un tiempo considerablemente más corto, dependiendo de las condiciones ambientales. Mientras que los plásticos tradicionales pueden tardar más de 1.000 años en degradarse, generando acumulación de residuos y la liberación de sustancias químicas en el aire [13].

### ***1.2.1 Tipos de bioplástico***

El concepto de bioplástico abarca diversas gamas de materiales con diferentes propiedades. Se dividen en tres grupos principales biobasados, biodegradables y algunos que poseen ambas cualidades [14].

1.2.1.a biobasados Son aquellos que están conformados parcial o totalmente por materia procedente de una fuente renovable a partir de productos vegetales, en lugar de materias primas fósiles.

Los bioplásticos biobasados no siempre son biodegradables como es el caso de algunos plásticos convencionales como el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el policloruro de vinilo (PVC)

que se pueden desarrollar a partir de fuentes renovables. Estos materiales pueden llegar a poseer las características exactas de sus homólogos no biobasados. Un ejemplo notable es el PE biobasado producido por la empresa brasileña Braskem, que utiliza etanol de caña de azúcar como materia prima renovable para su fabricación. Este tipo de bioplásticos, que logra igualar las características de los plásticos convencionales en términos de rendimiento y aplicaciones, se denominan "drop-in". Esto significa que pueden integrarse fácilmente en las cadenas de producción existentes, sin requerir ajustes significativos en los procesos industriales o en los productos finales [14].

1.2.1.b biodegradabilidad Son materiales que se descomponen a través de la acción de microorganismos presentes en el entorno en un período relativamente corto, de manera que no generan un impacto ambiental significativo. Durante este proceso, el material se transforma en agua, dióxido de carbono y compost. [14].

Algunos de los plásticos convencionales derivados de los materiales fósiles de carácter biodegradable son los policaprolactona (PLC) y el poli (adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) [14].

Es indispensable que contengan en la cadena principal grupos funcionales susceptibles que se puedan romper con facilidad por la acción de agentes externos de la naturaleza física o química. La biodegradación puede ser parcial o total. En una degradación parcial, el material se fragmenta en componentes más pequeños, pero no necesariamente en sustancias completamente inocuas. Por otro lado, una biodegradación total implica la conversión del material en compuestos simples, como dióxido de carbono, agua y biomasa, sin dejar residuos contaminantes en el entorno [15].

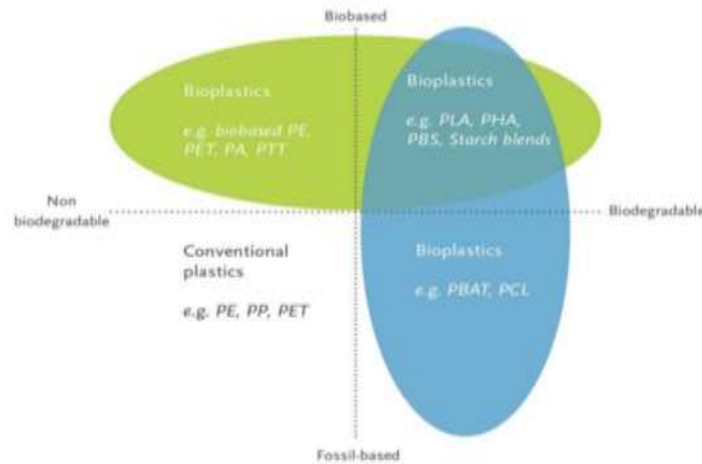
La tercera clasificación de bioplásticos corresponde a aquellos que son tanto biobasados como biodegradables, Según european bioplastic (2023) se convierte en una alternativa prometedora para sustituir a los plásticos convencionales [11].

Un ejemplo destacado dentro de esta categoría es el ácido poliláctico (PLA), un polímero obtenido a partir de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar. El PLA combina la ventaja de ser biobasado con la capacidad de degradarse bajo condiciones específicas, como en ambientes de compostaje industrial, ofreciendo una solución más ecológica frente a los plásticos derivados del petróleo [11],[14].En la Figura 4 se muestra una representación gráfica utilizando un plano cartesiano que organiza las diferentes clasificaciones de los bioplásticos. Este esquema

facilita la comprensión de cómo se agrupan según dos criterios principales: su origen (biobasado o no biobasado) y su capacidad de biodegradación (biodegradables o no biodegradables).

#### Figura 4

*Clasificación de los materiales de los bioplásticos*



**Nota.** En la figura 4 se representa como es la clasificación de los bioplásticos. Tomado de J. M. Madrid Rodríguez, *Bioplásticos en la industria del automóvil*, Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2020.

Como se describe en el apartado de morfología del fruto, los principales componentes químicos de la cascara de zapote son el agua y, en base seca, los polímeros presentes en las paredes celulares. Están constituidas principalmente por carbohidratos, como celulosa y hemicelulosa, que se combinan con lignina, proteínas, almidón y una pequeña fracción de compuestos inorgánicos y extractivos. Los carbohidratos, en particular, representan la mayor parte de la materia orgánica de la Tierra, lo que resalta su importancia no solo como base estructural en organismos vegetales, sino también según la asociación european bioplastic (2023) hoy en día los bioplásticos están hechos principalmente de plantas ricas en carbohidratos, como el maíz, caña de azúcar o remolacha azucarera: los llamados cultivos alimentarios o materias primas de primera generación.

La materia prima de primera generación es actualmente la más eficiente para la producción de bioplásticos, ya que requiere la menor cantidad de tierra para crecer y produce los rendimientos más altos [17],[11].

### 1.3 Los carbohidratos

Los carbohidratos son moléculas orgánicas cuyo carbono (C) se une a hidrógeno y oxígeno (H<sub>2</sub>O), en una proporción que se ajusta a la fórmula general C<sub>n</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>m</sub>), desempeñando diversas funciones en los seres vivos: sirven como almacén de energía, combustibles energéticos, intermediarios metabólicos, componentes estructurales, forman glucoconjugados y parte de moléculas como el ATP, de los ácidos nucleicos RNA y DNA, coenzimas, entre otras [17].

La clasificación de los carbohidratos se presenta en la Tabla 2, donde se detalla su categorización según el número de átomos de carbono, el grupo funcional al que pertenecen y ejemplos representativos. Los ejemplos están destacados en letra cursiva para facilitar su identificación y comprensión.

**Tabla 2**

Clasificación de los carbohidratos

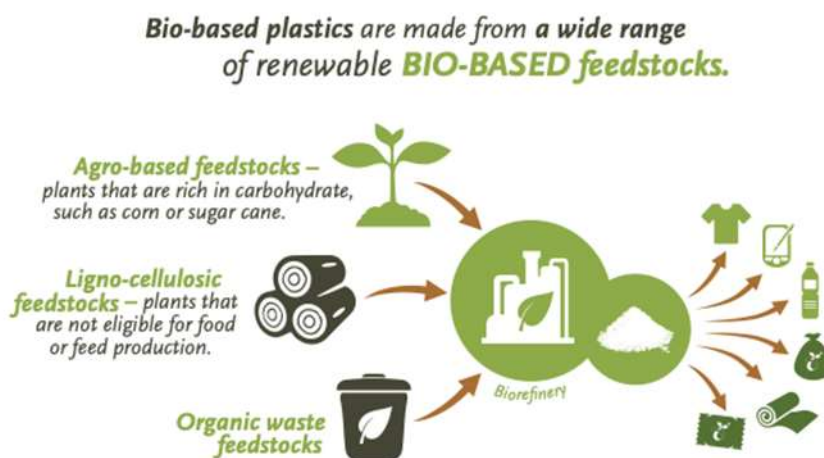
Clasificación	Grupo	Ejemplos
Monosacáridos simples	A.. Triosas B. Tetrasas C. Pentosas D. Hexosa E. Heptosas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aldosas : <i>gliceraldehido eritrosa</i> <i>ribosa glucosa</i></li> <li>● Cetosas : <i>dihidroxiacetona eritruosa</i> <i>ribulosa</i> <i>fructosa pseudoheptulosa</i></li> </ul>
Monosacáridos derivados	A. Ésteres B. Azúcares alcoholes C. Azúcares ácidos D. Azúcares aminados	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>glucosa-6-fosfato glicerol</i> <i>ácido glucurónico</i> <i>glucosamina</i></li> </ul>
Oligosacáridos	A. Disacáridos B. Trisacáridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Sacarosa</i></li> <li>● <i>Maltriosa</i></li> </ul>
Polímeros (Polisacáridos)	A. Homopolisacáridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Almidón</i></li> <li>● <i>Glucógeno</i></li> <li>● <i>Celulosa</i></li> </ul>
	B. Heteropolisacáridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Glucosaminoglicanos</i></li> <li>● <i>Proteoglucanos</i></li> </ul>

**Nota.** La tabla 2 se muestra la clasificación de carbohidratos. Tomado de F. Martínez Montes, J. Pardo Vázquez y H. Riveros Rosas, "Bioquímica de Laguna y Piña," El Manual Moderno, 15 de julio de 2018.

La figura 5 ilustra la producción de los plásticos biobasados a partir de una amplia variedad de fuentes renovables, clasificadas en tres categorías principales: materias primas agrícolas, como el maíz y la caña de azúcar, que son ricas en carbohidratos; materias primas lignocelulósicas, como la madera, provenientes de plantas no aptas para consumo humano o animal; y residuos orgánicos, como desechos alimenticios. Todas estas materias primas son procesadas en una biorrefinería, que las convierte en bioplásticos utilizados en diversos productos como botellas, bolsas, textiles y empaques, promoviendo una alternativa sostenible a los plásticos convencionales derivados del petróleo.

### Figura 5

*Material biológico para elaborar bioplástico*



**Nota.** La figura 5 muestra los materiales biológicos para elaborar bioplástico. Tomado de: European Bioplastics, "Frequently Asked Questions on Bioplastics," European Bioplastics, 2023. [Online]. Available:

[https://docs.europeanbioplastics.org/publications/EUBP\\_FAQ\\_on\\_bioplastics .pdf](https://docs.europeanbioplastics.org/publications/EUBP_FAQ_on_bioplastics.pdf).

#### 1.3.1 Polisacáridos

Los polisacáridos, también llamados glucanos, están constituidos por mínimo 10 o hasta miles de moléculas de monosacáridos. Su función en los organismos suele ser estructural o de almacenamiento energético. Se conoce como un homopolisacárido cuando la unidad de que se repite es siempre el mismo monosacárido, mientras que si son dos monosacáridos diferentes los que integran la unidad de repetición se denomina heteropolisacáridos [17].

Los polisacáridos se llegan a diferenciar debido a su tipo monosacáridos, longitud de la cadena y tipo de unión química entre los monosacáridos o en el grado de ramificación. Algunos de estos ejemplos son: almidón, celulosa, lignina y hemicelulosa.

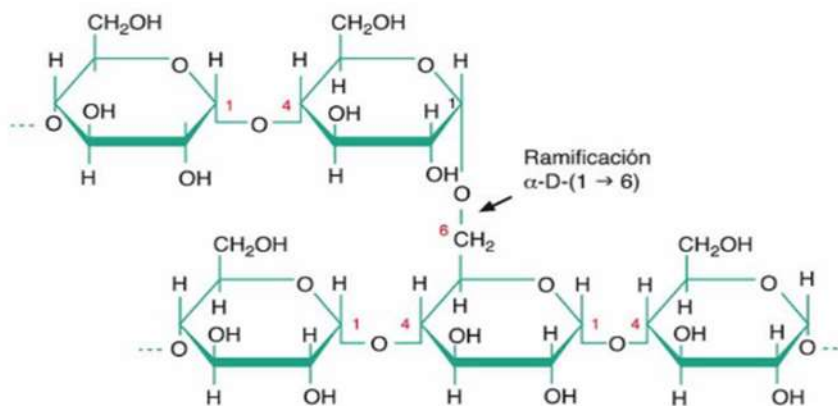
### 1.3.2 Almidón

El almidón está formado por unidades de glucosa combinadas entre sí por uniones glucosídicas. La unidad estructural de disacárido, repetida de manera periódica, es la maltosa, la cual da origen a dos tipos de moléculas, la amilosa y la amilopectina. La amilosa forma entre 10 y 20 % del almidón; es un polímero lineal de 300 a 350 unidades de glucosa con uniones  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 4). La amilopectina, más abundante, es un polímero ramificado de la glucosa y, aparte de las uniones  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 4) entre las moléculas sucesivas de glucosa, muestra otro tipo de unión, a nivel de la ramificación, en posición  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 6) [17].

En la Figura 6 se presenta el esquema de la ramificación de un polímero de glucosa. En este esquema, se incluyen dos cadenas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  1-4, mientras que la flecha en la figura señala la unión  $\alpha$  1-6, que es la responsable de la ramificación del polímero. Esta estructura de ramificación es crucial para la formación de polímero más complejos como el almidón.

#### Figura 6

*Esquema de la ramificación de un polímero de glucosa*



**Nota.** En la figura 6 se muestra el esquema de la ramificación de un polímero de glucosa. Tomado de : F. Martínez Montes, J. Pardo Vázquez y H. Riveros Rosas, "Bioquímica de Laguna y Piña," El Manual Moderno, accedido julio, 15 , 2018

### 1.3.3 Celulosa

La *celulosa*, de fórmula ( $C_6 H_{10} O_5$ ) es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza, está constituida por cadenas no ramificadas de unidades de glucosa enlazadas por uniones *glucosídicas  $\beta$ -D- (1 $\rightarrow$ 4)*. La *celulosa* y la *hemicelulosa* son los principales componentes de las paredes celulares de las plantas [17].

Las plantas, en base seca, contienen aproximadamente un 40% de celulosa, lo que permite estimar que los residuos agrícolas podrían generar alrededor de 2000 millones de toneladas de celulosa al año. Este recurso renovable contrasta con las 212,16 millones de toneladas métricas de petróleo y gas natural que se estiman disponibles para la producción de combustibles. A diferencia de los residuos agrícolas, que son renovables, el petróleo y el gas natural son recursos finitos, lo que resalta la importancia de las fuentes renovables en la producción de biocombustibles y bioplásticos [7].

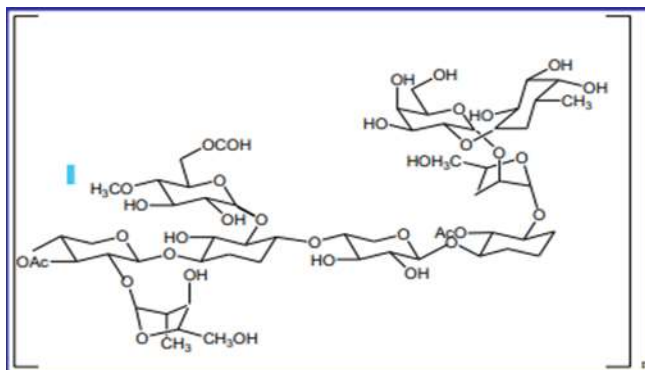
Este tipo de polímeros se produce mediante modificación química de la *celulosa* natural. Dentro de sus principales representantes, están los biomateriales compuestos de *celulosa*. Los polímeros de *celulosa* pueden ser utilizados en procesos de extrusión y moldeo [18]. La *celulosa* se obtiene principalmente de los granos de cereales, específicamente de la cascarilla o salvado, ya que el endospermo está compuesto mayoritariamente de *almidón*, lo que lo hace menos adecuado para la extracción de *celulosa*. La cascarilla, rica en fibras, se utiliza como una fuente clave de *celulosa* para la producción de bioplásticos y otros materiales [17].

Las propiedades fisicoquímicas de la *celulosa* son clave para su utilización en diversos procesos, y entre ellas se destacan el grado de polimerización, la cristalización y la porosidad. El grado de polimerización se refiere a la longitud de las cadenas de glucosa que componen la celulosa y es un indicador de su peso molecular. Este puede variar entre 10,000 y 150,000 unidades de glucosa. A mayor grado de polimerización, mayor es la resistencia mecánica y la insolubilidad de la celulosa. La cristalización afecta su estructura y facilita la formación de enlaces fuertes, mientras que la porosidad influye en su capacidad de absorción y la facilidad de modificación para diversas aplicaciones industriales [7].



## Figura 8

### Estructura química de la celulosa



**Nota.** La Figura 8 representa la estructura química de la Hemicelulosa. Tomado de: J. García, "Evaluación de la calidad de la fibra de los subproductos del fruto del zapote," Tesis de maestría, Universidad del Cauca, 2016.

### 1.3.5 Lignina

La lignina es uno de los polímeros más abundantes en las plantas, seguido de la celulosa. Su función es asegurar la protección contra la humedad y los agentes atmosféricos, además de actuar como elemento aglomerante de las fibras. La lignina es una sustancia amorfa, de estructura muy variable, localizada en la lámina mediana y en la pared secundaria [7].

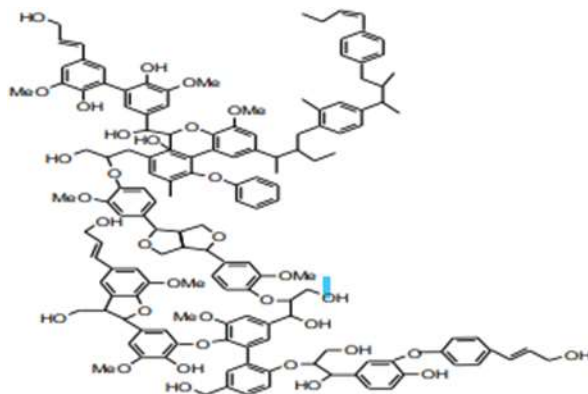
La definición estructural de la lignina nunca ha sido tan clara como la de otros polímeros naturales tales como celulosa y proteínas, debido a su naturaleza de sus múltiples unidades estructurales, las cuales no suelen repetirse de forma regular, dado que la composición y estructura de la lignina varían dependiendo de su origen y el método de extracción o aislamiento utilizado [19].

La investigación realizada por Marvin Chavez (2023) indica que la lignina está presente en todas las plantas vasculares, y al igual que muchos otros componentes de la biomasa, se forma mediante la reacción de fotosíntesis. La lignina está considerada como un recurso renovable asequible y de potencial uso industrial, cuya producción anual se ha estimado en el intervalo de 5-36 x 10<sup>8</sup> toneladas [19].

A continuación, en la figura 9 se presenta la estructura química de la lignina, caracterizada por una red de cadenas altamente ramificadas con múltiples repeticiones similares de unidades monoméricas. Además, incluye anillos aromáticos y varios grupos hidroxilo.

## Figura 9

### Estructura química de la lignina



**Nota.** La Figura 9 representa la estructura química de la lignina. Tomado de: J. García, "Evaluación de la calidad de la fibra de los subproductos del fruto del zapote," Tesis de maestría, Universidad del Cauca, 2016.

### 1.4 Obtención de pulpa de celulosa

Para obtener la pulpa de celulosa, es necesario realizar su aislamiento, lo que implica la disolución de la lignina que se encuentra unida a las fibras de celulosa en el material vegetal. Este proceso puede llevarse a cabo mediante procedimientos mecánicos, químicos o una combinación de ambos (semi-químicos) [20]. Con respecto a los procedimientos de obtención de pulpa de celulosa por medio de la investigación realizada por Ascensión Sanz (2015) menciona que la obtención de celulosa a nivel mundial es un estimado de 300 millones de toneladas de celulosa, cerca de un 76% correspondieron a celulosas químicas y sólo un 24 % a celulosas mecánicas [20]. Por lo tanto se debe conocer de manera clara como se realiza cada procedimiento de extracción.

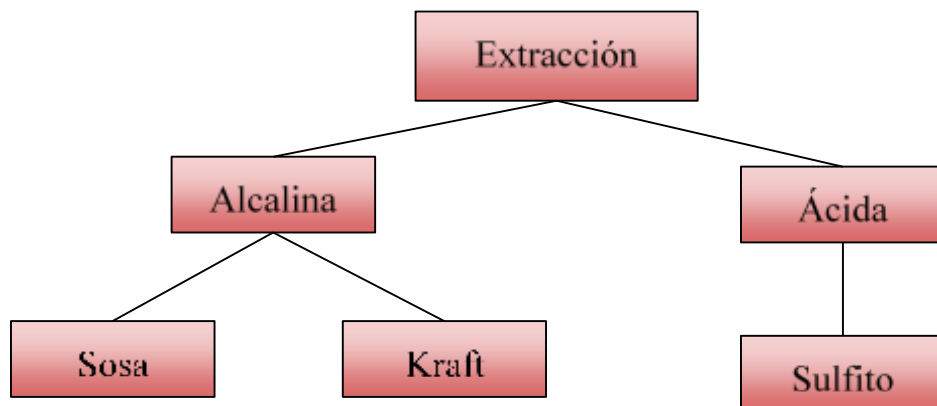
#### 1.4.1 Celulosa química

Se obtiene a partir de la cocción de la madera con químicos, a temperaturas y presiones elevadas, con la finalidad de separar la lignina que se encuentra adherida a las fibras mediante la acción de una solución alcalina, cuyo resultado son fibras de celulosa libres. Dependiendo de los químicos que se utilicen para este tratamiento, se puede obtener dos tipos de procesos o celulosas: Tipo Sulfito y Tipo Kraft de los cuales el ultimo presenta mejores características y se ha convertido en la más aplicada en industrias extractoras de pulpa de celulosa [21].

A continuación, en la figura 10 se muestra un diagrama donde se expresa de manera más clara la información consultada de los principales métodos de extracción química utilizados en la obtención de celulosa, clasificándolos según la naturaleza ácida o básica de las soluciones empleadas.

### Figura 10

*Procedimientos de extracción química de celulosa*



**Nota.** La figura 10 representa algunos de los procesos químicos utilizados en la extracción de celulosa. Tomado de: "Química Orgánica Industrial," Escuela de Ingenierías Industriales - UVa. [En línea]. Disponible en: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>. [Accedido el 18 de abril de 2024].

#### 1.4.2 Celulosa mecánica

La celulosa mecánica se obtiene mediante proceso de molienda o trituración, en donde la materia prima se somete a altas presiones y a una temperatura estimada de unos 140 °C, que corresponde a la temperatura de transición vítrea de la lignina. Este método, aunque implica un elevado consumo energético, destaca por su alto rendimiento, alcanzando entre un 85% y un 95%, lo que significa que en el producto final queda esta proporción del material original [20],[ 21].

Por otro lado, varios estudios han demostrado que para extraer los monosacáridos del material lignocelulósico, es necesario liberar la celulosa y hemicelulosa de la lignina, para posteriormente someterlas a un proceso de hidrólisis.

## **1.5 Generalidades del pretratamiento**

La finalidad de realizar un pretratamiento a un material orgánico para extraer la celulosa es mejorar el rendimiento en la obtención de azúcares fermentables, así como aumentar la disponibilidad de los polímeros a partir de la biomasa inicial para las operaciones posteriores. Este proceso también contribuye a disminuir la cristalinidad de la celulosa y a aumentar su porosidad, lo que facilita su posterior tratamiento. Además, se busca evitar la degradación de los hidratos de carbono, impedir la formación de productos que puedan inhibir los procesos de hidrólisis y fermentación. Además, es fundamental garantizar que el proceso se lleve a cabo con un menor costo [22],[23].

A continuación se muestra la clasificación de los diferentes pretratamiento

### ***1.5.1 Pretratamiento físicos***

En el pretratamiento físico, el tamaño de la particular se reduce, lo que conlleva al aumento en el área superficial y en el tamaño de poro. Además este proceso provoca una disminución de la cristalinidad y grado de polimerización de la celulosa [23].

1.5.1.a molturación: Es el método implementado para reducir el tamaño del residuo y con ello la cristalinidad de la celulosa, a la vez que se incrementa la superficie de ataque hidrolítico. Mediante este proceso se consigue incrementar la digestibilidad de la biomasa pero conlleva un consumo de energía que es tanto mayor cuanto más dura es la madera y más pequeño el tamaño final [22].

1.5.1.b pirólisis. La pirólisis implica calentar el residuo a temperaturas mayores de 300 °C generando gases combustibles y un residuo carbonoso, pero a temperaturas inferiores la descomposición es menor y el residuo puede ser tratado con ácido diluido y condiciones no muy severas, alcanzando conversiones cercanas al 100 %. El proceso de pirólisis puede mejorarse si se añaden  $ZnCl_2$  o  $Na_2CO_3$  [22].

### ***1.5.2 Pretratamiento físico-químico***

Los pretratamientos físico-químicos son un enfoque combinado que rompe los enlaces de hidrógeno e incrementa el área superficial a temperaturas que oscilan entre 50 y 250 °C. El tiempo de exposición es un factor crucial, ya que si la exposición al calor es prolongada, se pueden formar mayores cantidades de productos inhibidores, afectando negativamente los procesos de hidrólisis y fermentación posteriores [23].

1.5.2.a autohidrolisis o steam explosión: En la autohidrolisis la biomasa previamente reducida de tamaño es tratada con vapor saturado a alta presión durante un tiempo prefijado, seguido de una descompresión súbita que provoca la explosión de las fibras de la biomasa. Las temperaturas y tiempos de trabajo típicos varían entre 160 y 260 °C y de unos pocos segundos hasta varios minutos, respectivamente. Durante este proceso, la hemicelulosa se degrada y la lignina se transforma debido a las altas temperaturas. Si se considera únicamente la solubilización de la hemicelulosa, es posible utilizar tanto temperaturas elevadas con tiempos de contacto cortos como temperaturas bajas con tiempos prolongados [22].

Presenta aspectos interesantes como el menor consumo energético, no produce desechos que tengan carácter peligroso al medio ambiente. Sin embargo no hay una destrucción completa de los xilanos de la hemicelulosa, no consigue romper de manera completa la estructura formada por la lignina y celulosa y puede presentar productos inhibidos para la posterior hidrólisis y fermentación [22].

La auto hidrólisis utiliza agua líquida como reactivo, resulta ser más eficiente que el proceso de "steam explosión", ya que proporciona mejores resultados en la disolución de hemicelulosa y evita la formación de inhibidores que afectan la fermentación. Además, el tratamiento con agua caliente a presión actúa de manera similar a un ácido débil, sin requerir neutralización. Este método de pretratamiento permite la recuperación completa de xilanos y logra una conversión superior al 90% en las etapas posteriores de hidrólisis y fermentación simultáneas [22].

1.5.2.b proceso afex. En este pretratamiento, la biomasa se expone a una disolución de amoníaco a alta presión y temperatura durante un tiempo estipulado, y posteriormente se despresuriza súbitamente. Una de las principales ventajas de este método es que no solubiliza la hemicelulosa, lo que permite que quede en el residuo sólido, listo para la hidrólisis. Es decir, el residuo final es prácticamente el mismo que el inicial, pero con mayor facilidad para llevar a cabo la hidrólisis. Sin embargo, a pesar de esta ventaja, presenta un inconveniente relacionado con los altos valores de residuo de lignina, lo que reduce la efectividad del proceso. Además, requiere un sistema de recirculación de amoníaco para disminuir los costos operativos [22].

1.5.2.c explosión con  $\text{CO}_2$ . El proceso de explosión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se asemeja a los dos procesos anteriores donde el  $\text{CO}_2$  puede formar  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , mientras que la descompresión súbita rompe la estructura cristalina del material, lo que incrementa la velocidad de la hidrólisis posterior [22]. Sin embargo, se considera el proceso menos efectivo de los pretratamientos físico-químicos.

### ***1.5.3 Pretratamientos químicos***

Los pretratamientos químicos tienen como finalidad remover la hemicelulosa y la lignina presentes en la biomasa. El tipo de desarrollo de este proceso depende del agente químico utilizado, que puede ser ácido, alcalino, oxidativo u orgánico. Cada uno de estos agentes actúa de manera diferente, facilitando la liberación de los componentes de la biomasa.

1.5.3.a ozonólisis. El uso del ozono en el pretratamiento de biomasa se basa en su capacidad para oxidar la lignina, lo que le permite eliminar gran parte de este componente. Además de su acción sobre la lignina, el ozono también ataca de manera leve a la hemicelulosa, facilitando la posterior hidrólisis de la celulosa. Una de las principales ventajas de este proceso es que puede llevarse a cabo a temperatura y presión ambiente, lo que reduce la necesidad de condiciones extremas y el consumo energético asociado con otros métodos.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, el uso del ozono presenta una desventaja significativa por el costo elevado del proceso. La generación de ozono requiere equipos especializados y una fuente de energía considerable, lo que eleva los costos operativos. Esto convierte al ozono en una opción menos accesible en comparación con otros pretratamientos, especialmente en escalas más grandes o en procesos donde la rentabilidad es clave [22].

1.5.3.b pre-hidrólisis ácida. El pretratamiento ácido interrumpe las fuerzas de Van der Waals, los enlaces de hidrógeno y los enlaces covalentes que mantienen unidos los componentes de la biomasa. Como resultado, se produce la lisis celular y la liberación de los compuestos orgánicos intracelulares [23].

En la investigación realizada por Ana Espinoza y colaboradores (2021) nos indica que el ácido sulfúrico es el reactivo más utilizado en los pretratamientos ácidos. Sin embargo se han reportado el uso de ácido acético, nítrico y clorhídrico [23].

Suele ser más eficiente implementar disoluciones diluidas y utilizar altas temperaturas en los procesos, las cuales pueden clasificarse en dos categorías:

- Altas temperaturas: superiores a 160°C, aplicadas en procesos continuos con contenidos de sólidos entre el 5 % y el 10 %.
- Bajas temperaturas: inferiores a 160°C, empleadas en procesos discontinuos con contenidos de sólidos entre el 10 % y el 40 %.

Luego del proceso se requiere realizar un proceso de neutralización del ácido por medio de agua destilada con el fin de obtener un pH 7.

1.5.3.c pre-hidrólisis alcalina. Al implementar álcalis, principalmente NaOH, es crucial considerar la cantidad de lignina presente. Si el contenido de lignina es elevado, este método se vuelve menos efectivo y debería reconsiderar su uso. El empleo de la Solución de un álcali provoca que en el residuo haya hinchazón, incremento del área superficial interna, disminución en el grado de polimerización y cristalización, separación entre la lignina y la celulosa y ruptura de la estructura cristalina [22].

#### ***1.5.4 Pretratamiento biológico***

Los pretratamientos biológicos pueden llevarse a cabo mediante la acción de microorganismos, como bacterias y hongos, o mediante el uso de enzimas específicas. Algunos hongos poseen la capacidad de degradar tanto la lignina como la celulosa, liberando sus constituyentes individuales. Este enfoque tiene ventajas significativas, como un menor consumo de energía y un impacto ambiental reducido, ya que no genera contaminantes. Sin embargo, una de las principales desventajas de este método es su baja velocidad de acción y el costo de las enzimas, lo que limita su eficacia en procesos industriales a gran escala [22],[23].

Los pretratamientos mejoran la eficiencia de los pasos posteriores, debido que disuelven los polisacáridos no deseados y promueven el hinchamiento de las fibras facilitando el acceso de la fase fluida al interior de la pared celular [23],[24].

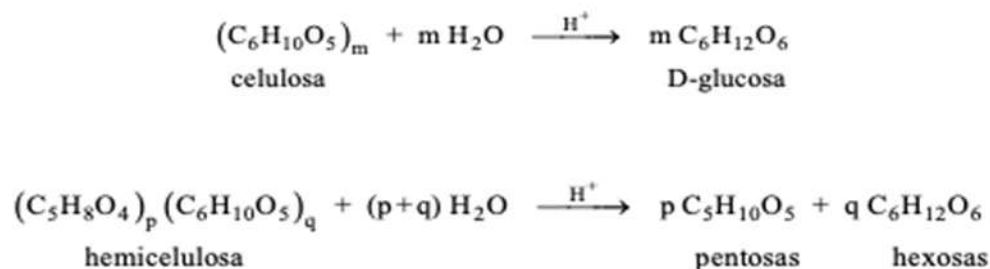
### 1.6 Generalidades de hidrólisis

La hidrólisis se refiere a la disociación de una sal en agua, los iones de la sal interactúan con el agua liberando iones hidrógeno  $H^+$  e iones  $OH^-$ . La hidrólisis por lo general requiere el uso de un catalizador ácido o básico, si se trata de la disociación de una base en agua, el pH es mayor a 7 y si se disocia un ácido en agua, el pH es menor a 7 [25].

En la figura 11 se muestra de forma simplificada las reacciones que ocurren durante la hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa. En la primera reacción, la celulosa, bajo la acción de un catalizador ácido ( $H^+$ ), se descompone en su monómero principal, la D-glucosa. En la segunda reacción, la hemicelulosa es hidrolizada también mediante un catalizador ácido, liberando azúcares simples, como pentosas y hexosas.

#### Figura 11

*Las reacciones de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa*



**Nota.** La Figura 11 representa las reacciones de forma simplificada de la hidrólisis de la celulosa y de la hemicelulosa. Tomado de : M. I. Romero Pulido, “hidrólisis ácida y enzimática del residuo de poda de olivo. fermentación de hidrolizados con pachysolen tannophilus”, tesis doctoral, univ. jaen, jaen, 2003.

La hidrólisis de la biomasa, es una etapa importante para la separación o la formación de polímeros y azúcares que constituyen la base para procesos posteriores de obtención de bioalcoholes y otros

productos, de tal manera que mientras se alcance una mayor concentración en monosacáridos, mejor será el rendimiento hacia los productos finales de fermentación [27].

Se clasifica en tres técnicas según catalizador utilizado en la hidrólisis:

### ***1.6.1 Hidrólisis con ácido concentrado***

Los procesos que utilizan ácidos concentrados fueron los primeros en desarrollarse dado que son capaces de romper la estructura cristalina de la celulosa empleando bajas temperaturas y cortos tiempos de contacto. En la hidrólisis con ácidos concentrados se suele emplear disoluciones de ácidos minerales, tales como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), etc., de alta concentración a temperaturas inferiores a 100°C. A estas condiciones de proceso se logra disolver la celulosa y la hemicelulosa en forma de sus sacáridos simples. Presenta una crucial desventaja por el uso de disoluciones corrosivas por esta razón se implementa instrumentos de acero inoxidable caracterizado por su precio elevado, además es necesario la recuperación del ácido para que el proceso sea más económico y amigable con el medio ambiente [22].

### ***1.6.2 Hidrólisis con ácidos diluidos***

En la hidrólisis por medio de ácido diluido no ataca a la estructura cristalina de la celulosa con facilidad a temperaturas bajas, por esta razón necesita utilizar altas temperaturas, en la que los azúcares generados se degradan con mucha facilidad. Se recomienda utilizar en biomasa con estructura amorfa, y fundamentalmente hemicelulosa [22].

En el proceso de hidrólisis con ácido diluido se hidrolizan de forma separada la hemicelulosa y la celulosa. En la primera etapa se hidroliza la hemicelulosa, en condiciones suaves y temperatura inferiores a los 100°C y en la segunda etapa de hidrólisis de la celulosa, donde las temperaturas empleadas son aproximadamente a 200°C provocando que se obtenga productos de degradación tanto de la celulosa como la lignina [22].

La velocidad de hidrólisis del residuo no influye de gran forma en el tamaño de partícula aunque haya difusión interna. Sin embargo, la temperatura y ácido tiene gran implicación de degradación de azúcares. A mayor relación sólido/líquido mayor en la concentración de azúcares en solución a partir de eso la velocidad de degradación es mayor [22].

A nivel industrial, uno de los procesos más relevante es la hidrólisis mediante ácidos minerales, ya sea en concentraciones diluidos o concentradas, predominando el ácido sulfúrico. Este método

destaca por su simplicidad y su principal ventaja frente a los demás tipos de hidrólisis: su alta velocidad. El tratamiento con ácido sulfúrico diluido ha sido ampliamente estudiado debido a que es considerado, económico, conveniente y efectivo para biomasa [27].

### ***1.6.3 Hidrólisis alcalina***

La hidrólisis alcalina es un proceso químico donde hay una sustancia álcali sometida a altas temperaturas y presiones considerables, que al disolverse, desintegra la biomasa[26]. Este tratamiento elimina la lignina a través de escisión, es decir, la división de los enlaces de éter y solubiliza la hemicelulosa a través de la saponificación de los enlaces éster intermoleculares entre hemicelulosa y lignina, aumentando la porosidad y la accesibilidad general a la celulosa. Los productos químicos utilizados en los pretratamiento alcalino incluyen hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  y amoníaco  $\text{NH}_3$ , que pueden usarse en combinación con agentes oxidativos. Una de las limitaciones asociadas al tratamiento alcalino es la conversión en sales irre recuperables o la incorporación de estas en la biomasa, que perjudica los tratamientos posteriores [27].

### ***1.6.4 Hidrólisis enzimática***

El proceso de hidrolisis enzimática de la biomasa requiere como paso previo, un pretratamiento para favorecer el acceso de las enzimas a los centros de reacción [22]. Este paso es crucial para facilitar la descomposición de los polisacáridos en monosacáridos se lleva a cabo mediante la aplicación de microorganismos y enzimas. La hidrólisis enzimática de estos materiales no solo depende de la efectividad de las enzimas, sino también de las características físicas, químicas y morfológicas del lignocelulósico. Los factores que influyen en la hidrólisis enzimática se dividen en dos grupos: Factores relacionados con las enzimas se centran en mejorar la actividad enzimática, abordando la inhibición del producto final, la estabilidad térmica, la sinergia y la adsorción. Factores relacionados con el sustrato se enfocan en mejorar la accesibilidad de las enzimas a la celulosa. Sin embargo, el principal desafío de este proceso es el bajo rendimiento de la reacción y el elevado costo de las enzimas [27].

## **1.7 Caracterización del bioplástico**

La caracterización de un bioplástico es el proceso mediante el cual se identifican, analizan y describen las propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas de este tipo de material. Este análisis permite evaluar aspectos como su resistencia a la tracción, módulo de elasticidad,

biodegradabilidad, composición química y comportamiento frente a diferentes condiciones ambientales. Además, la caracterización incluye la determinación de ciertas propiedades, este proceso es esencial para determinar su idoneidad en aplicaciones industriales, validar su impacto ambiental y garantizar su desempeño en comparación con plásticos tradicionales.

### ***1.7.1 Espesor***

El espesor es una variable fundamental para determinar las propiedades y aplicaciones de los bioplásticos. Se define como la distancia perpendicular entre dos superficies del material. Conocer este parámetro permite obtener información valiosa sobre propiedades reológicas, mecánicas y de barrera a gases o vapor de agua, lo cual es crucial para evaluar su rendimiento en diferentes usos industriales y ambientales.

El espesor de los bioplásticos puede medirse utilizando herramientas como micrómetros digitales o manuales (calibrador pie de rey), que ofrecen precisión y confiabilidad en la caracterización del material [30].

### ***1.7.2 Permeabilidad de vapor de agua***

Según “Annual Book of Standards” (ASTM E96-80) define la permeabilidad al vapor de agua (Pva) como la tasa de transmisión de vapor de agua por unidad de área de un material, de espesura conocida, que es inducida por una diferencia de presión entre dos superficies específicas, con condiciones de temperatura y humedad relativa específicas [30]. Se considera que el proceso de permeabilidad de gases y vapores a través de los espacios intermoleculares de un material tiene lugar en 3 etapas: a) la sorción y la solubilidad del líquido en la superficie del material; b) difusión de permear a través del material debido a la acción de un gradiente de concentración; c) la desorción y la evaporación del líquido en el otro lado del material [31].

Para calcular el flujo de permeabilidad al vapor de agua (Fva) se usa la ecuación 1:

#### **Ecuación 1.**

*Flujo de permeabilidad al vapor de agua*

$$Fva = \frac{g}{tA} \quad [1]$$

Donde g es la pérdida de peso, A es el área de permeabilidad y t el tiempo total en horas.

Luego se calcula la permeabilidad (PVA) a partir de la ecuación 2:

### **Ecuación 2.**

#### *Permeabilidad*

$$Pva = \left(\frac{g}{tA}\right) * \left(\frac{X}{\Delta P}\right) \quad [2]$$

Donde  $\left(\frac{g}{tA}\right)$  es igual a el flujo de permeabilidad al vapor de agua, X es la media del espesor del bioplástico y  $\Delta P$  la diferencia de presión de vapor del medio ambiente que contiene el desecador (0 kPa, 25 °C) y el agua pura (3169 kPa a 25°C) [32].

Evaluar materiales por la propiedad de permeabilidad al vapor de agua es crucial, debido a que algunos materiales permitir el paso de vapor de agua, lo cual es un inconveniente significativo, para sectores como el envasado de alimentos o productos sensibles a la humedad. La permeabilidad al vapor de agua puede comprometer la calidad y durabilidad de los productos, por lo que este procedimiento se vuelve indispensable para asegurar la efectividad de la barrera. Al evaluar y optimizar la barrera, se puede extender la vida útil de los productos y mejorar su rendimiento, lo que resulta esencial para satisfacer las necesidades de conservación y protección en diversas aplicaciones industriales [30].

Otra propiedad de gran relevancia en los bioplásticos, es la solubilidad debido a influye en el desempeño, aplicaciones y sostenibilidad de los materiales. Evaluar esta característica permite determinar como el bioplástico interactúa con el agua.

#### **1.7.3 Sostenibilidad de agua**

Se define como la medida de capacidad que tiene una determinada sustancia de disolverse en otra, expresado como la proporción de disolución de la primera sustancia en la segunda. Según Shih [40], normalmente los polisacáridos son altamente higroscópicos y se desintegran rápidamente en agua [32].

La solubilidad se calculará utilizando la ecuación 3:

### **Ecuación 3.**

*Solubilidad*

$$\%solubilidad = \left(1 - \left(\frac{PI-PF}{PI}\right)\right) * 100 \quad [3]$$

Donde PI peso inicial y PF peso final después del secado.

Las propiedades mecánicas de las películas dependen de la naturaleza de la materia prima utilizada y de su cohesión estructural, la cual está relacionada con la capacidad del polímero para formar enlaces fuertes y/o numerosos a nivel molecular entre dos cadenas poliméricas, facilitando así su separación [34].

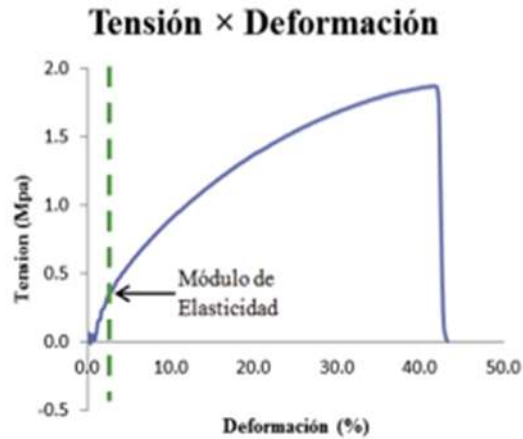
#### **1.7.4 Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad se define como la relación entre la tensión aplicada a un material y la deformación resultante dentro del límite elástico, donde el módulo de elasticidad es directamente proporcional a la deformación. Este parámetro permite evaluar la rigidez del material, es decir, su capacidad para resistir deformaciones bajo una carga específica [32].

La figura 12 presentada muestra una gráfica de tensión contra deformación, donde se analiza el comportamiento mecánico de un material al ser sometido a una fuerza. En el eje vertical se representa la tensión (en MPa), mientras que en el eje horizontal la deformación (en porcentaje). El gráfico evidencia una relación lineal en la región inicial, correspondiente al límite elástico. El módulo de elasticidad, marcado en la figura con una línea discontinua verde. A medida que el material experimenta una mayor deformación, el comportamiento deja de ser lineal hasta alcanzar un punto máximo antes de su falla.

**Figura 12**

*Curva de la resistencia de tensión vs deformación*



*Nota.* En. La figura 12 se evidencia el comportamiento de un material sometido a la tensión y deformación, con respecto al módulo de elasticidad. Tomado de: N. Vicentini, "Elaboração e caracterização de filmes comestíveis a base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita," Tesis de Doctorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, SP, 2003.

La ecuación utilizada para calcular el módulo de elasticidad (EE) se expresa de la siguiente manera:

#### **Ecuación 4.**

*Módulo de elasticidad*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [4]$$

Donde:

- E es el **módulo de elasticidad** (MPa o N/mm<sup>2</sup>).
- $\sigma$  es el **esfuerzo** (MPa o N/mm<sup>2</sup>).
- $\varepsilon$  es la **deformación unitaria** (adimensional).

### ***1.7.5 Fuerza de tracción***

Es la fuerza que se aplica a lo largo del eje de un material para estirarlo o alargarlo, Se genera al alejar los extremos del material en direcciones opuestas, creando una tensión que provoca su elongación. En el régimen elástico, esta fuerza es proporcional al alargamiento, siguiendo la Ley de Hooke, hasta que el material alcanza su resistencia a la tracción, el límite máximo que puede soportar antes de romperse [34].

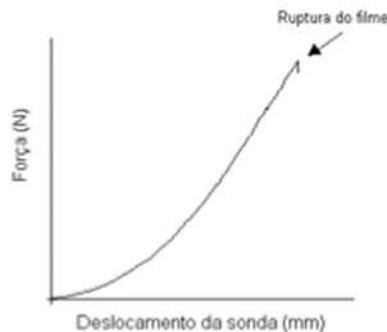
### ***1.7.6 Deformación de ruptura***

Es la exposición del material a una fuerza externa (F) en función de su desplazamiento hasta alcanzar el pico denominado la fuerza de ruptura, expresada en newton(N), ocurriendo la ruptura de la película siendo este punto la deformación de falla expresarse en mm [34].

En la figura 13 se presenta la relación entre la fuerza aplicada (en newtons, eje vertical) y el desplazamiento de una sonda (en milímetros, eje horizontal) durante un ensayo mecánico de un material en forma de película. El gráfico evidencia un incremento continuo de la fuerza a medida que aumenta el desplazamiento, indicando una respuesta mecánica progresiva del material. En el punto marcado como "ruptura do filme", se observa el máximo esfuerzo soportado por la película antes de fallar, lo cual refleja su resistencia a la tensión. Este tipo de análisis es clave para evaluar la integridad mecánica de materiales delgados.

### Figura 13

*Curva de fuerza vs distancia obtenida en la prueba de perforación*



**Nota.** En la figura 13 se observa el comportamiento durante una prueba de perforación hasta el punto de deformación de rotura del bioplástico. Tomado de : N. Vicentini, "Elaboração e caracterização de filmes comestíveis a base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita," Tesis de Doctorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, SP, 2003.

La deformación de rotura se calcula como el cambio relativo en la longitud de un material cuando este alcanza su punto de ruptura bajo una carga. Este parámetro se expresa en porcentaje y permite evaluar la capacidad de un material para deformarse antes de fracturarse. La ecuación general es:

#### **Ecuación 5.**

*Deformación de ruptura*

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} \frac{\sqrt{D^2+l_0^2}-l_0}{l_0} \quad [5]$$

Donde  $l_0$  es la longitud inicial,  $l$  longitud final,  $\Delta l$  representa el cambio de longitud en el sistema y  $D$  hace referencia a la distancia recorrida.

#### **1.7.7 Biodegradabilidad**

Los polímeros biodegradables se descomponen mediante la acción enzimática de microorganismos. Según la normativa estadounidense ASTM 6400, el material se considera biodegradable si al menos el 60% de su composición se degrada o se convierte en compost en un

plazo máximo de 180 días. Esta norma es menos estricta en comparación con las regulaciones europeas, que suelen exigir un mayor nivel de biodegradabilidad en un tiempo similar [43].

La ecuación 5 se emplea para determinar la biodegradabilidad de un material, expresando la relación entre la diferencia del peso inicial y el peso final sobre el peso inicial, en términos porcentuales. Esta ecuación permite cuantificar la pérdida de material durante el proceso de degradación y se define de la siguiente manera:

### **Ecuación 6.**

#### *Biodegradabilidad*

$$\% \text{ pérdida de peso} = \frac{(\text{peso inicial seco} - \text{peso final seco})}{\text{peso inicial seco}} * 100 \quad [6]$$

Las siguientes secciones del documento han sido estructuradas con el propósito de cumplir los objetivos establecidos en la investigación. Cada capítulo corresponde al desarrollo de un objetivo específico, proporcionando así un enfoque organizado y claro que facilita la comprensión del progreso y los resultados obtenidos en el estudio.

## **2. IDENTIFICACIÓN DEL MÉTODO MAS APROPIADO PARA LA REALIZACIÓN DEL BIOPLÁSTICO**

A lo largo de este capítulo, se busca determinar el método más adecuado para la obtención de bioplástico a partir de la cáscara de zapote. Para ello, se realizó una revisión exhaustiva de diversos procesos de elaboración de bioplásticos propuestos por distintos autores, analizando las características particulares de cada uno. Estos procesos fueron organizados en función de sus similitudes y diferencias, con el fin de establecer comparaciones que faciliten la selección del método más eficiente y compatible con las propiedades de la cáscara de zapote.

Los métodos revisados fueron el acetato de celulosa (CA), hidrólisis ácida, nanocelulosa, fermentación directa de biomasa (polihidroxialcanoatos), y la polimerización de ácido láctico. En términos generales, estos procesos implican la transformación de la celulosa en biopolímeros, mediante alteraciones químicas en su estructura, lo que permite la obtención de materiales moldeables y adecuados para su uso como bioplásticos. En el método de acetato de celulosa, se realiza el proceso de acetilación de la celulosa con ácido acético y anhídrido acético, resultando en un bioplástico flexible y biodegradable, ideal para aplicaciones como filtros y películas. La hidrólisis ácida, por otro lado, descompone la celulosa utilizando ácidos concentrados o diluidos, liberando azúcares simples que son modificados con ayuda de plastificantes (glicerina) para producir bioplásticos. La nanocelulosa, obtenida mediante un proceso mecánico o químico, ofrece materiales con alta resistencia mecánica y propiedades de barrera excepcionales. La fermentación directa de biomasa, transforman azúcares por medio de microorganismos en polímeros como los polihidroxialcanoatos (PHA), por último el proceso de polimerización de ácido láctico implica la conversión de azúcares derivados de la celulosa en ácido láctico, que se polimeriza para formar PLA, un bioplástico ampliamente utilizado.

A lo largo de la investigación, se han recopilado diversas publicaciones que implementan estos procesos en la producción de bioplásticos. En dichas investigaciones, los materiales obtenidos son sometidos a rigurosas pruebas físico-químicas con el fin de evaluar sus propiedades, como la resistencia mecánica, la biodegradabilidad, permeabilidad a vapor de agua, su comportamiento frente a la humedad, entre otras. Estas pruebas son esenciales para determinar la aplicabilidad de los bioplásticos derivados de la celulosa, desde empaques hasta productos médicos o textiles,

abriendo un abanico de posibilidades para el aprovechamiento de residuos agrícolas y la sustitución de plásticos convencionales por materiales más sostenibles.

## **2.1 Selección del pretratamiento**

La elección del proceso de pretratamiento más adecuado para la producción de bioplástico a partir de cáscara de zapote es un aspecto crucial que depende de diversos factores técnicos y económicos. Para asegurar la obtención de una celulosa de alta pureza, que sea apta para su posterior modificación y conversión en bioplástico, es esencial seleccionar el proceso adecuado. En este sentido, se propone la utilización de una matriz de selección guiada por la metodología Angela forero(2018)[45] la cual permite identificar las condiciones óptimas de los diferentes factores involucrados en el pretratamiento, minimizando la variabilidad y maximizando la eficiencia del proceso. Esta metodología facilita la toma de decisiones al considerar múltiples variables y proporcionar una evaluación precisa de los impactos de cada factor sobre la calidad y el rendimiento de la celulosa, lo que a su vez asegura la viabilidad económica y técnica de la producción del bioplástico.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los pretratamientos evaluados para la extracción de celulosa. Esta información es fundamental para llevar a cabo una evaluación objetiva y comparativa, que permitirá seleccionar el proceso más adecuado para obtener una celulosa de alta pureza. Este proceso es crucial para asegurar que la celulosa sea apta para su posterior modificación y utilización en la producción de bioplásticos, garantizando así la eficiencia del proceso y el rendimiento del material final.

**Tabla 3***Ventajas y desventajas de los pretratamientos*

PRETRAT-AMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	Ref.
MOLIENDA	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La reducción del tamaño de las partículas aumenta el área superficial, mejorando la accesibilidad a la celulosa.</li> <li>-Alto rendimiento entre un 85-95 %.</li> <li>El tiempo promedio del proceso varía entre 30 minutos y 2 horas..</li> <li>-Permite modificar la celulosa sin afectar su estructura ni propiedades clave.</li> <li>-Menor costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El consumo de energía aumenta según las características de la materia prima, especialmente cuando es necesario romper estructuras rígidas para extraer celulosa.</li> <li>-El proceso no degrada eficazmente la lignina y presenta el riesgo de oxidación de la celulosa.</li> <li>-La celulosa obtenida es menos resistente y tiene una pureza limitada.</li> </ul>	[22] [20]
AUTO-HIDRÓLISIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presenta un menor consumo energético.</li> <li>-No genera desechos peligrosos para el medio ambiente.</li> <li>-Ausencia de catalizadores.</li> <li>-Alta eficacia en residuos agrícolas y en maderas duras.</li> <li>-Se puede usar con partículas de mayor tamaño.</li> <li>-Opera a altas presiones y temperaturas (190°C-240°C) durante 1 a 30 minutos, con temperaturas más altas que aumentan la degradación de la hemicelulosa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se destruyen completamente los xilanos de la hemicelulosa..</li> <li>-No rompe completamente la estructura de la lignina ni destruye por completo los xilanos de la hemicelulosa.</li> <li>-Puede presentar productos inhibidores que interfieren en la posterior hidrólisis y fermentación.</li> <li>-Altos costos de producción.</li> <li>-Se incrementan los procesos, requiriendo una segunda exposición al vapor.</li> <li>-El proceso requiere un alto consumo de agua, lo que puede afectar su sostenibilidad, especialmente en áreas con recursos hídricos limitados.</li> </ul>	[22] [46]
PROCESO AFEX	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No solubilizar la hemicelulosa quedando en el residuo sólido listo para la hidrólisis.</li> <li>- No se produce subproductos tóxicos ni inhibidores.</li> <li>- El proceso consiste en tratar la biomasa con amoníaco líquido a temperaturas de 60°C a 140°C y presiones de 250-300 psi en un reactor.</li> <li>- Presenta una conversión del 90 % a productos fermentables.</li> <li>- Rendimientos altos de azúcar.</li> <li>- El tiempo de reacción es de 5 a 30 minutos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los altos niveles de lignina, entre el 20% y 35%, reducen la efectividad de la extracción de celulosa y afectan la calidad del bioplástico.</li> <li>- Es necesario recircular el amoníaco para reducir los costos de producción.</li> <li>- No es tan efectivo en maderas duras y blandas.</li> <li>- Consumo energético entre medio a alto.</li> </ul>	[22] [46] [47]

**Tabla 3. Continuación**

<p>EXPLOSION N CO<sub>2</sub></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Usa disolvente (CO<sub>2</sub>) que no son toxico ni produce compuestos corrosivos durante su uso.</li> <li>-Fácil recuperación del CO<sub>2</sub> para reutilizar.</li> <li>-A temperaturas superiores a 200 °C penetra la biomasa.</li> <li>-Es un buen disolvente para procesos de extracción.</li> <li>-Tiempo de producción de 10 a 30 minutos.</li> <li>-Consumo energético medio a bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menos efectivo de los pretratamiento físico-químico.</li> <li>-El elevado coste de los equipos para mantener la alta demanda de presión limita su uso a gran escala.</li> </ul>	<p>[22] [45]</p>
<p>OZONÓLISIS</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se generan inhibidores de fermentación.</li> <li>- Su selectividad para degradar lignina se debe a su composición rica en dobles enlaces y anillos aromáticos, lo que minimiza subproductos y mejora la calidad del material obtenido.</li> <li>- Opera a temperatura y presión ambiente.</li> <li>- La ausencia de fase líquida evita problemas de separación, reacciones secundarias y pérdidas de ozono no reaccionado.</li> <li>-Tiempo de reacción de 4 a 6 horas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El ozono tiene una vida activa limitada en el agua, de aproximadamente 25 minutos.</li> <li>- Alto consumo energético</li> <li>- Alto costo en el proceso y en los equipos a implementar.</li> <li>- Alta sensibilidad al entorno</li> <li>- Uso de gran cantidad de ozono</li> </ul>	<p>[44] [22]</p>
<p>PRE HIDRÓLISIS S ÁCIDA</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utiliza soluciones diluidas o concentradas de ácidos a elevadas y bajas temperaturas respectivamente.</li> <li>- Mayor exposición del área superficial de la celulosa.</li> <li>-El uso de ácido sulfúrico diluido (0.1 %-5.0 % p/p) a temperaturas entre 130 °C y 210 °C mejora significativamente la velocidad y eficiencia de la hidrólisis de celulosa.</li> <li>-Presenta una conversión de celulosa de un 91%.</li> <li>- El tipo de ácido no afecta en gran proporción las propiedades de la celulosa.</li> <li>- A partir de ácido diluido el tiempo de reacción se encuentra entre 1 a 2 horas mientras que en el ácido concentrado de 15 a 30 minutos</li> <li>- Los ácidos generalmente usados son <i>ácido sulfúrico diluido</i> y <i>ácido clorhídrico</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere neutralización para alcanzar pH 7.</li> <li>- Se puede generar subproductos inhibidores</li> <li>- Los ácidos concentrados presentan una alta corrosión al exponer los equipos.</li> <li>- Exige algunos costosos materiales implementados para el desarrollo del tratamiento.</li> <li>- Consumo de energético medio a alto</li> </ul>	<p>[22][ 27][4 5]</p>

**Tabla 3.** *Continuación*

<p>PRE HIDRÓLISI S ALCALINA</p>	<p>Aumentan la digestibilidad de la celulosa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-La eficiencia en la solubilización de lignina depende de un bajo contenido de lignina en la biomasa.</li> <li>-Disminución en el grado de polimerización y cristalinidad de celulosa.</li> <li>-Disrupción de la estructura de la lignina en la madera dura y los residuos agrícolas.</li> <li>-Los reactivos más utilizados son NaOH, NH<sub>3</sub>, CaO y Ca (OH)<sub>2</sub>.</li> <li>-Mostró una conversión de 43 %</li> <li>-Consumo energético moderado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Formación o incorporación de sales irrecuperables en la biomasa.</li> <li>-El proceso requiere tiempos de reacción largos (días o semanas) debido a las bajas temperaturas y concentraciones utilizadas.</li> </ul>	<p>[22][45][46]</p>
---	--	---	---------------------

**Nota.** En la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes pretratamientos.

A partir de los datos recolectados en el cuadro comparativo, se elaboró una matriz de selección basados en la metodología de Ana Espinoza y otros (2021) [23] donde realiza un análisis cualitativo de factores ponderados. Esta matriz permitió comparar los diferentes aspectos clave como el consumo energético, la pureza de la celulosa obtenida, la eficiencia de la extracción, el impacto ambiental, el costo de implementación, el tiempo de procesamiento y la escalabilidad. Este método de selección se destaca por su simplicidad y rapidez, lo que lo convierte en una herramienta práctica para la toma de decisiones. No obstante, presenta ciertas limitaciones, ya que los puntajes asignados a cada criterio pueden estar influenciados por la subjetividad del investigador, lo que puede afectar la reproducibilidad de los resultados.

La implementación de este método requirió la aplicación de un filtro entre los diversos métodos disponibles, asignando puntuaciones a los criterios clave definidos para el proceso. Este enfoque permite una diferenciación objetiva entre las opciones, simplificando la selección del pretratamiento más adecuado.

En este proceso de selección para la toma de decisiones se consideraron las ventajas y desventajas de todos los métodos de pretratamiento, previamente planteadas en la Tabla 2. A partir de este análisis, se definieron y establecieron los criterios de evaluación más adecuados, asegurando que no alteraran el proceso. Por lo tanto, los pasos desarrollados en este proceso de selección fueron los siguientes:

- Listar los criterios más importantes para la evaluación es esencial para asegurar que todos los aspectos relevantes se consideren en el análisis.
- Asignar a los criterios un peso relativo, dividido en diferentes partes, tiene como objetivo lograr que la suma total de las puntuaciones alcance 100. Este enfoque permite reflejar la importancia relativa de cada criterio en el proceso de evaluación, asegurando que todos los aspectos clave sean considerados de manera equilibrada en la decisión final.
- Evaluar de manera individual cada uno de los métodos del estudio según cada criterio, utilizando una escala específica del 1 al 5. Esta evaluación permite asignar una puntuación que refleje el desempeño relativo de cada método en función de los criterios establecidos, facilitando una comparación detallada y objetiva.
- El valor obtenido de la evaluación se multiplicará por el peso asignado a cada criterio, con el fin de obtener el valor ponderado. Este valor ponderado refleja la importancia relativa de cada criterio en la evaluación general del método.
- Se suma el producto de cada valor ponderado para obtener la puntuación total. Este cálculo permite consolidar la evaluación de todos los criterios y proporciona una medida integral de la eficacia de cada método.
- Identificando el método más apropiado según el mayor puntaje obtenido de los valores ponderados.

El propósito del estudio fue identificar el pretratamiento que se destacara principalmente por su capacidad para extraer de manera eficiente y obtener celulosa pura a partir de la cáscara de zapote. Estos criterios fueron considerados de gran relevancia para facilitar la modificación de la celulosa y, consecuentemente, permitir la elaboración eficiente del bioplástico. Además, se incluyeron criterios de importancia moderada que añadieron valor al criterio principal, tales como el tiempo de producción, el consumo energético, el impacto ambiental y el costo de implementación. Cabe mencionar que el proyecto se llevó a cabo a nivel de laboratorio.

Después de haber establecidos los criterios, se procedió con una calificación detallada, la cual se basó en aspectos específicos que permitieron evaluar de manera objetiva cada uno de los métodos propuestos. Este proceso de calificación tuvo como objetivo proporcionar una evaluación

cuantitativa y cualitativa que facilitó la comparación entre las distintas opciones como se muestra a continuación:

**El criterio de extracción de celulosa** fue evaluado en función de la eficiencia de los métodos utilizados, empleando una escala de puntuación de 1 a 5. Un puntaje de 1 se asignó a los métodos que demostraron una baja eficiencia en la extracción de celulosa, obteniendo rendimientos muy bajos o resultados insatisfactorios. Una puntuación de 2 se otorgó a aquellos métodos que, aunque más eficientes que el anterior, aún presentaron limitaciones en cuanto al rendimiento de la extracción, logrando resultados medianos. Se otorgó una puntuación de 3 a los métodos que alcanzaron un rendimiento aceptable en la extracción de celulosa, obteniendo buenos resultados, pero con márgenes de mejora. Un puntaje de 4 se asignó a los métodos que lograron una alta eficiencia en la extracción, obteniendo una cantidad significativa de celulosa con mínimos desperdicios. Finalmente, una puntuación de 5 se reservó para los procesos que demostraron una eficiencia sobresaliente, extrayendo la mayor cantidad de celulosa posible con pocos recursos y logrando resultados óptimos.

**El criterio de pureza de la celulosa** fue evaluado en función de la calidad de la celulosa extraída, utilizando una escala de puntuación de 1 a 5. Un puntaje de 1 se asignó a los métodos que produjeron celulosa con una alta cantidad de impurezas, lo que afectó su calidad y su potencial para aplicaciones posteriores. Una puntuación de 2 correspondió a los métodos que, aunque extrajeron celulosa, no lograron una pureza adecuada, presentando una cantidad considerable de contaminantes o subproductos que reducían su calidad. Se otorgó una puntuación de 3 a aquellos métodos que lograron una celulosa de calidad intermedia, con un nivel aceptable de pureza, pero aún con presencia de algunas impurezas que requerirían procesos adicionales para mejorarla. Los métodos que recibieron una puntuación de 4 produjeron celulosa con un alto grado de pureza, con pocas impurezas y adecuada para aplicaciones sin necesidad de procesos adicionales de purificación. Finalmente, una puntuación de 5 se reservó para los procesos que extrajeron celulosa casi pura, con mínima o ninguna contaminación, lo que la hacía adecuada para usos avanzados sin requerir purificación adicional.

**El criterio del costo de operación**, se evaluó con respecto a la facilidad de adquisición de utensilios y reactivos dentro del territorio nacional, considerando las restricciones legales vigentes. En Colombia, el decreto 2897 de 2011, expedido por el Ministerio de Justicia, regula las sustancias

controladas que requieren permisos especiales para su comercialización o uso. Además, se tuvo en cuenta el valor comercial de estos reactivos. La valoración de cada método se clasificó en una escala del 1 al 5, siendo 1 la puntuación para las restricciones significativas para la obtención y un costo excesivo, lo que lo hacía inviable; la puntuación 2 implicaba restricciones en la venta y adquisición que requerían trámites, retrasando el proceso; la puntuación 3 indicaba facilidad en la obtención, pero a un costo elevado; la puntuación 4 señalaba accesibilidad moderada y un precio relativamente asequible; y la puntuación 5 reflejaba un producto fácil de conseguir y con un precio rentable, contribuyendo a la eficiencia del proceso.

**El criterio de tiempo de producción** se estableció con base en la duración máxima para los pretratamientos químicos, que es de 8 horas, y para los pretratamientos físicos, que es de 1 hora. Estos tiempos fueron estimados a partir de los datos obtenidos en la tabla 3, donde se indican los rangos en los que se realiza cada pretratamiento. Por esta razón, se calificó cada método en una escala de 1 a 5, considerando que aquellos pretratamientos que requieren tiempos más cortos recibirían una puntuación más alta, mientras que los que se acercan o superan estos límites serían puntuados más bajos. La escala se definió de la siguiente manera: una puntuación de 1 se asignó a procesos que superan las 10 horas; la puntuación 2 a los pretratamientos que se encuentran en un rango de 10 a 8 horas; la puntuación 3 a aquellos en un rango de 8 a 6 horas; la puntuación 4 para pretratamientos que se sitúan entre 6 a 4 horas; y la puntuación 5 para pretratamientos con tiempos entre 4 horas a 15 minutos.

**El criterio de impacto ambiental** fue evaluado en relación con los efectos que el pretratamiento tiene sobre el medio ambiente, utilizando una escala de puntuación de 1 a 5. Un puntaje de 1 se asignó a los métodos que generaban un impacto altamente negativo, como aquellos que producían residuos peligrosos o emitían contaminantes significativos que podían dañar el ecosistema. Una puntuación de 2 correspondió a procesos que, aunque no tan severos, aún tenían un impacto considerable, liberando compuestos nocivos que afectaban el medio ambiente. Se otorgó una puntuación de 3 a los métodos que utilizaban solventes tóxicos y materiales que, aunque efectivos, representaban un riesgo ambiental debido a su potencial contaminante. Los métodos que recibieron un puntaje de 4 emplearon materiales menos tóxicos y fueron más amigables con el medio ambiente, reduciendo significativamente los residuos y emisiones perjudiciales. Finalmente, una puntuación de 5 se reservó para procesos que cumplieran con los principios de la química verde,

generando un impacto ambiental mínimo o nulo, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y promoviendo prácticas responsables y ecológicas.

**El criterio de consumo energético**, se consideró la eficiencia del proceso para determinar la viabilidad de cada método en la producción de bioplásticos. La puntuación se realizó en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un consumo energético extremadamente alto que hace el proceso insostenible; 2 indica un consumo elevado que podría ser un obstáculo significativo para la implementación a gran escala; 3 refleja un nivel de consumo moderado, aceptable pero no óptimo; 4 corresponde a un proceso energéticamente eficiente, con un consumo bajo que favorece la rentabilidad; y 5 se asigna a métodos que muestran un consumo energético mínimo, destacándose por su sostenibilidad y eficiencia

**El criterio de escalabilidad** fue evaluado en función de la capacidad de cada método para ser implementado a mayor escala, utilizando una escala de puntuación de 1 a 5. Un puntaje de 1 se asignó a los métodos que presentaron dificultades significativas para ser escalados debido a su complejidad, altos costos o la necesidad de equipos especializados que no podían ser fácilmente replicados en una mayor capacidad de producción. Una puntuación de 2 correspondió a los métodos que, aunque podían escalarse, requerían ajustes considerables en los procesos o infraestructura, lo que aumentaba los costos o complicaba la implementación a gran escala. Se otorgó una puntuación de 3 a aquellos métodos que presentaron una escalabilidad moderada, siendo posibles de adaptar a mayores volúmenes de producción, pero con ciertos desafíos en términos de costo o optimización. Los métodos que recibieron una puntuación de 4 demostraron una buena capacidad para ser escalados, con una infraestructura relativamente fácil de adaptar a gran escala y costos controlables. Finalmente, una puntuación de 5 se reservó para los procesos que mostraron una escalabilidad excelente, siendo fácilmente replicables a gran escala con costos razonables y sin comprometer la eficiencia ni la calidad del producto.

A continuación, en la Tabla 4 se presentó la calificación de los siete métodos de pretratamiento previamente establecidos, evaluados en función de criterios específicos que fueron asignado un peso porcentual según su importancia relativa en el proceso. Los criterios analizados incluyeron el consumo energético, con un peso del 10%; la pureza de la celulosa obtenida, con un 30%; la eficiencia de extracción, con un 25%; el impacto ambiental, con un 15%; el costo de operación, con un 10%; el tiempo de procesamiento, con un 10%; y la escalabilidad, con un 5%. Cada método

fue calificado utilizando una escala que permitió reflejar su desempeño en relación con estos criterios clave.

Posteriormente, se multiplicó la calificación asignada a cada criterio por su peso porcentual, obteniendo así un valor ponderado (P) para cada método en función de su desempeño en los distintos aspectos evaluados. Estos valores ponderados se sumaron con cada pretratamiento para calcular un puntaje total, el cual permitió identificar el método con la mejor calificación y el mayor rendimiento general, destacándose como el más adecuado para los objetivos del proceso.

A todos los pretratamiento se le asignaron un numero de método como se ve a continuación :

MÉTODO 1: Autohidrolisis

MÉTODO 2: Prehidrolisis alcalino

MÉTODO 3: Ozonólisis

MÉTODO 4: Prehidrolisis ácida

MÉTODO 5: Molienda

MÉTODO 6: Explosión de CO<sub>2</sub>

MÉTODO 7: AFEX

**Tabla 4**

*Matriz de selección de valores ponderados*

Criterio	Peso (%)	MÉTODOS													
		1	P	2	P	3	P	4	P	5	P	6	P	7	P
Consumo Energético	10 %	4	0,4	3	0,3	3	0,3	4	0,4	2	0,2	3	0,3	3	0,3
Pureza de la Celulosa Obtenida	30 %	4	1,2	2	0,6	3	0,9	4	1,2	3	0,9	5	1,5	5	1,5
Eficiencia de extracción	25 %	4	1	3	0,75	4	1	5	1,25	5	1,25	3	0,75	5	1,25
Impacto ambiental	15 %	4	0,6	3	0,45	3	0,45	3	0,45	4	0,6	4	0,6	2	0,3
Costo de operación	10 %	4	0,4	3	0,3	3	0,3	4	0,4	4	0,4	3	0,3	3	0,3

Tiempo de procesamiento	10 %	4	0,4	2	0,2	4	0,4	4	0,4	5	0,5	4	0,4	4	0,4
Escalabilidad	5 %	3	0,15	3	0,15	2	0,1	4	0,4	4	0,2	2	0,1	3	0,15
Total	100 %		4,15		2,75		3,45		4,3		4,05		3,95		4,2

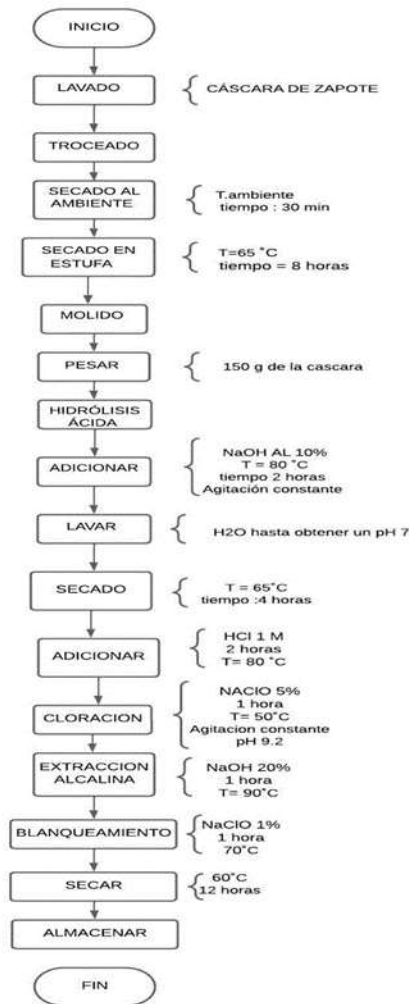
**Nota.** En la tabla 4 se evidencia la evaluación de los métodos escogidos a partir de unos específicos criterios

Los resultados obtenidos en la Tabla 4, denominada Matriz de selección de valores ponderados, indicaron que el método con la mejor valoración fue el Método 4, correspondiente al prehidrolisis ácido. Este pretratamiento destacó principalmente por su alta eficiencia en la extracción de celulosa (5 puntos) y la elevada pureza de la celulosa obtenida (4 puntos), criterios clave para su selección debido a su relevancia en la elaboración de bioplásticos. Aunque este método presenta el inconveniente de generar subproductos con potencial contaminante, el impacto ambiental, evaluado con 3 puntos, puede ser mitigado mediante estrategias como la recuperación y reutilización de los ácidos empleados. Adicionalmente, este pretratamiento obtuvo una calificación alta en términos de tiempo de procesamiento (5 puntos), lo que se debe a las elevadas temperaturas de operación que aceleran las reacciones químicas, reduciendo significativamente los tiempos requeridos. Según lo reportado por Ángela Forrero [45], este método se distinguió también por su adaptabilidad en procesos industriales gracias a su eficiencia y bajo tiempo de operación, reforzando así su viabilidad como un proceso óptimo para la producción de bioplásticos. A pesar de ciertas limitaciones en escalabilidad y costos de operación, la combinación de sus ventajas técnicas y su desempeño general lo convierten en una opción preferida dentro de los métodos evaluados.

A continuación, en la Figura 14 se presenta el diagrama para la extracción de celulosa a partir de cáscara de zapote (basado en la metodología de Carlos y otros [52] y De la Cruz [51] con algunas modificaciones)

**Figura 14**

*Proceso de extracción de celulosa*



**Nota.** En la figura 14 se muestra el procedimiento del prehidrolisis acida según la metodología de metodología de Carlos y otros, De la Cruz con algunas adaptaciones. Tomado de : L. T. De la Cruz Rodríguez, “Eficiencia de la celulosa obtenida a partir de raquis de Musa paradisiaca para remoción de cadmio en aguas superficiales.”, trabajo de grado, Univ. Cesar Vallejo, CHICLAYO – PERÚ, 2019. J. B. A. Pinos y C. A. M. Cajamarca, "Obtención de acetato de celulosa a partir de colillas de cigarrillo, "\*Reviberpol.org\*. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-23-2-63-81.pdf> (recuperado el 3 de septiembre de 2024).

## **2.2 Selección de modificación de celulosa**

Una vez que se identificó el pretratamiento más adecuado para la extracción de celulosa, fue esencial llevar a cabo una matriz de selección para determinar el método apropiado de modificación de la celulosa y la posterior obtención de bioplástico. Este análisis implicó una evaluación de las ventajas y desventajas de cada método, considerando factores clave como las propiedades mecánicas y química, la eficiencia, los costos, el impacto ambiental y la facilidad de implementación. El objetivo fue asegurar la selección del método más idóneo para los propósitos de producción, maximizando tanto la calidad del bioplástico obtenido como la viabilidad técnica y económica del proceso.

A continuación, en la Tabla 5 se plasmaron las ventajas y desventajas asociadas a los procesos utilizados para obtener bioplástico. En esta tabla, se detallaron los aspectos positivos y negativos de cada método de modificación de celulosa evaluado, proporcionando una visión clara de su desempeño en diferentes factores como la eficiencia en la obtención de bioplástico, el impacto ambiental, la rentabilidad de los procesos, los costos de producción, la complejidad operativa, la calidad del bioplástico producido. Este análisis permitió tener una visión más completa sobre las fortalezas y limitaciones de cada proceso, facilitando la toma de decisiones para seleccionar el método más adecuado según los objetivos del proyecto.

**Tabla 5***Métodos para elaborar bioplástico*

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	REF
ACETATO DE CELULOSA (CA)	<p>La CA cuenta con alta estabilidad química y mecánica.</p> <p>Facilidad de disponibilidad</p> <p>Alta resistencia a la tracción y suficiente flexión.</p> <p>No es inflamable y tiene baja toxicidad..</p> <p>El CA tiene potencial para ser utilizado en aplicaciones industriales y biomédicas, como filtros, membranas, empaquetado, adhesivos, recubrimientos, aislamiento eléctrico y liberación de fármacos.</p> <p>Ofrece resistencia a la permeación de metanol y posee una estructura y grupo funcional atractivos en sus cadenas principales..</p> <p>Es uno de los primeros termoplásticos moldeados por extrusión e inyección, caracterizado por ser duro, brillante, incoloro, transparente, amorfo, con buena claridad y estabilidad a los rayos UV.</p> <p>Bajo costo en la producción.</p> <p>Módulo de elasticidad: 1000-1500 MPa. Resistencia a la tracción: 20-50 MPa. Deformación de ruptura: 5-20%.</p>	<p>Aunque tiene propiedades foto-degradables, carece de capacidad biodegradable.</p> <p>El material, al ser hidrofílico, absorbe humedad en ambientes húmedos, lo que puede causar cambios dimensionales y afectar su estabilidad y rendimiento.</p> <p>Tiene un bajo rendimiento como aislante térmico y una resistencia limitada al envejecimiento, al calor y a diversos reactivos y disolventes.</p>	<p>[48]</p> <p>,</p> <p>[49]</p> <p>,</p> <p>[50]</p> <p>,</p> <p>[52]</p> <p>,</p> <p>[54]</p>

**Tabla 5. Continuación**

<p>NANO CELULOS A</p>	<p>-Alta rigidez y resistencia a la tracción.          -Utilizado por los bioplásticos para modificar diferentes propiedades de barrera, de resistencia, entre otras.          -La funcionalidad de la superficie de un material influye en su capacidad de autoensamblaje, regula la dispersión en matrices poliméricas y afecta la adhesión entre partículas y entre las partículas y la matriz. Esto permite un control sobre las propiedades mecánicas y la distribución del material en compuestos.          -Diversas técnicas como homogeneización, microfluidización, criotrituración y micromolienda se utilizan para obtener celulosa nanofibrilada (NFC) o microfibrilada (MFC). Paralelamente, la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico concentrado produce nanocristales de celulosa (NCC), conocidos también como nanocelulosa cristalina o nanowhiskers.          -Presenta propiedades única, como lo son su carácter renovable y gran disponibilidad.          -Aumentar las propiedades mecánicas y mejorar la estabilidad térmica de los compuestos poliméricos          -Alta biocompatibilidad          -La homogenización es uno de los métodos más utilizados tanto a escala de laboratorio como en operaciones a gran escala por su eficiencia, simplicidad y por no necesitar de solventes orgánicos en su procedimiento</p> <p>Tiempo aproximadamente de 1-12 horas dependiendo del método a utilizar.</p> <p>Módulo de elasticidad: 5000-7000 MPa.          Resistencia a la tracción: 100-150 MPa.          Deformación de ruptura:          2-5%.</p>	<p>El proceso requiere una cantidad considerable de energía para romper y modificar la estructura de las fibras.</p> <p>Los equipos utilizados en la producción de nano-celulosa, especialmente aquellos que operan a alta presión y con acción mecánica intensa, están sujetos a desgaste prematuro, lo que aumenta los costos de mantenimiento.</p> <p>Escalabilidad limitada.</p> <p>Bajo rendimiento del proceso alrededor de un 15% a partir de un 35-45% de celulosa</p> <p>Alta absorción de la humedad</p>	<p>[58]          ,[59]          ],          [60]</p>
-------------------------------	---	--	--

**Tabla 5. Continuación**

<p>FERMENTACIÓN DIRECTA DE BIOMASA (polihidro-xialcanoatos)</p>	<p>Presentan alta biodegradabilidad</p> <p>Los bioplásticos se dividen en dos categorías principales: homopolímeros, como el polihidroxibutirato (PHB), que son materiales cristalinos y rígidos con alta resistencia estructural, pero poca flexibilidad; y heteropolímeros, como el hidroxibutirato-hidroxicvalerato (PHBV), que son más elásticos, menos cristalinos y ofrecen mayor ductilidad y resistencia a la deformación, ideales para aplicaciones que requieren flexibilidad y resistencia a impactos.</p> <p>Los PHA tienen altos pesos moleculares y propiedades termoplásticas o elastoméricas, lo que los hace aptos para diversas aplicaciones industriales.</p> <p>Resistencia al agua e impermeabilidad al oxígeno</p> <p>Alta biocompatibilidad. Módulo de elasticidad: 1000-3000 MPa. Resistencia a la tracción: 20-40 MPa. Deformación de ruptura: 3-15%.</p>	<p>Bajo punto de fusión los heteropolímeros.</p> <p>Los costos de producción de los poliésteres de polihidroxicvalcanoatos (PHA) aún son más altos que los de los poliésteres sintéticos convencionales.</p> <p>Procesos complejos de optimización para cada etapa del proceso de producción. Esto incluye la selección de sustratos económicos, la optimización del proceso de fermentación, y la mejora de las etapas de extracción y purificación del producto.</p> <p>Dependencia de las fuentes de carbono por lo tanto es importante gestionar adecuadamente la disponibilidad de nutrientes, especialmente el nitrógeno, para lograr una producción más eficiente y rentable.</p> <p>Rendimiento bajo debido a que se requiere mayor cantidad de biomasa y energía para obtener una baja cantidad de biopolímero</p>	<p>[61], [62]</p>
---	--	---	-------------------

**Tabla 5. Continuación**

<p>POLIMERIZACIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Uso generalmente en dispositivos médicos</li> <li>-Alta biocompatibilidad.</li> <li>-Baja toxicidad.</li> <li>-Produce subproductos de gran aplicabilidad como lo son lactato de calcio.</li> <li>-Altas propiedades mecánicas como lo son fuerza de tensión, módulo de tensión, resistencia al desgaste y al rayado.</li> <li>-La barrera al agua y al CO<sub>2</sub> del PLA es bastante buena, la barrera al O<sub>2</sub> es considerada buena.</li> <li>-El PLA puede ser formulado para ofrecer una amplia gama de propiedades, desde rigidez similar a la del acrílico hasta flexibilidad como la del polietileno. Además, puede adaptarse para ofrecer distintos niveles de resistencia, siendo tan rígido como el poliestireno o tan flexible como un elastómero. También resiste procesos de esterilización con rayos gamma y mantiene su estabilidad frente a la exposición a rayos ultravioleta.</li> <li>-Presenta características térmicas por su elevado punto de fusión (175-178°C) y una temperatura transmisión vítrea (60-65°C).</li> <li>-Módulo de elasticidad: 2000-4000 MPa.</li> <li>-Resistencia a la tracción: 50-70 MPa.</li> <li>-Deformación de ruptura: 2-10%.</li> </ul>	<p>La baja productividad espacio-temporal en los procesos de producción se debe a varios factores: el mayor volumen de equipamiento necesario para trabajar con bajas concentraciones de azúcares y productos, lo que resulta en tiempos de conversión más largos durante la fermentación; el alto costo de separación debido a la baja productividad del proceso; y la necesidad de varias etapas de purificación para obtener el producto final.</p> <p>Presenta una elongación limitada.</p> <p>La baja temperatura de distorsión térmica (HDT) del material puede ser un problema en aplicaciones de empaque expuestas a picos de calor, como durante el llenado, transporte o almacenamiento, ya que podría provocar su deformación y comprometer la integridad del producto.</p> <p>Es lenta biodegradabilidad y esto depende si la cristalización es elevada.</p>	<p>[58] [63] [64]</p>
--	---	--	-------------------------------

**Nota.** La tabla 5 representa la comparación de los métodos para la modificación de la celulosa con sus ventajas y desventajas.

A partir de la información obtenida y plasmada en el cuadro comparativo (Tabla 5), se llevó a cabo una matriz de selección para determinar el método más adecuado para la obtención de bioplástico. Esta matriz se basó en un análisis detallado de las ventajas y desventajas de los

diferentes métodos. La evaluación se centró en varios criterios clave, que fueron fundamentales para determinar la viabilidad y eficacia de cada método en función de los objetivos del proceso de producción.

La selección del método adecuado consideró aspectos técnicos, operacionales, costo, impacto ambiental, propiedades químicas y físicas, tiempo de operación y biodegradabilidad. Se aplicó un enfoque ponderado, asignando pesos a cada criterio para identificar el método con el mejor equilibrio entre eficiencia, costo y sostenibilidad.

El objetivo fue obtener un bioplástico de alta calidad, con propiedades comparables a los plásticos convencionales, asegurando su funcionalidad y aplicación en diversas industrias. Para ello, se establecieron criterios clave de evaluación en el proceso de elaboración. Uno de los criterios con mayor peso en la evaluación de bioplásticos fue el análisis de sus propiedades mecánicas y químicas, las propiedades mecánicas especialmente en lo que respecta a la resistencia a la tracción, flexibilidad y durabilidad. Estas propiedades se evaluaron siguiendo la norma ASTM D-638, un estándar ampliamente utilizado para medir la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la deformación de ruptura.

La resistencia a la tracción se clasificó según los rangos establecidos en la norma: termoplásticos rígidos (30-80 MPa), plásticos flexibles (10-30 MPa), y elastómeros y materiales flexibles (2-10 MPa). En cuanto a la deformación de ruptura, se consideraron los siguientes rangos: termoplásticos rígidos (1-10 %), materiales flexibles (20-500 %) y elastómeros (>500 %). Para el módulo de elasticidad, los materiales rígidos fueron calificados en el rango de 1000-4000 MPa, los plásticos flexibles entre 200-800 MPa y los elastómeros por debajo de 100 MPa. Para evaluar los criterios de desempeño, se utilizó el rango establecido para termoplásticos rígidos según la norma ASTM D-638. Los materiales fueron puntuados en una escala de 1 a 5, donde se asignó 1 a aquellos con valores significativamente inferiores al mínimo; 2 a los que se encontraban en el límite inferior o próximos a salir del rango; 3 a los que cumplían con los valores mínimos; 4 a los que estaban en el rango superior o mostraban tendencia a excederlo, y 5 a los materiales que superaban ampliamente los valores mínimos, destacándose por su calidad excepcional. Este sistema permitió una evaluación objetiva y estructurada para comparar materiales según sus propiedades mecánicas clave.

El criterio de biodegradabilidad evalúa la capacidad del bioplástico para descomponerse de manera natural en el medio ambiente sin causar daños significativos. Este aspecto es crucial para asegurar que el bioplástico cumpla con las expectativas ambientales y contribuya a la sostenibilidad. Según la norma ASTM D6400, un material debe degradarse en un 90% o más en un período de 180 días bajo condiciones específicas de compostaje industrial para ser considerado biodegradable. La puntuación para la biodegradabilidad se estableció de la siguiente manera; El bioplástico que no cumple con los criterios de compostabilidad y supera más de los 180 días, o tiene un tiempo de descomposición significativamente mayor al establecido por la norma, tiene una puntuación de 1 y los bioplástico que se descompone en un 90% o más en 180 días, cumpliendo con los estándares óptimos de compostabilidad establecidos por la norma, demostrando una descomposición eficiente y completa, tiene una puntuación de 5.

El criterio de las propiedades químicas, agrupan aspectos como la humedad, la permeabilidad al agua y la solubilidad en agua. La permeabilidad al agua mide la capacidad del bioplástico para resistir la penetración o absorción de agua, un factor clave en aplicaciones donde el material estará en contacto con ambientes húmedos o líquidos. Por otro lado, la solubilidad en agua es crucial para determinar la estabilidad del bioplástico en entornos acuosos. La escala de puntuación para este criterio se organiza de la siguiente manera: los bioplásticos con alta permeabilidad y solubilidad, que comprometen su resistencia en ambientes húmedos, reciben una puntuación de 1; los que presentan una permeabilidad y solubilidad moderadas, mostrando cierta debilidad en aplicaciones en contacto con agua, obtienen una puntuación de 2; los bioplásticos con resistencia aceptable al agua, pero con ligera solubilidad en condiciones extremas, reciben una puntuación de 3; aquellos con buena impermeabilidad y baja solubilidad, adecuados para la mayoría de las aplicaciones, se califican con 4; finalmente, los bioplásticos que presentan una excelente impermeabilidad y resistencia al agua, siendo altamente estables en ambientes húmedos, obtienen una puntuación de 5.

El criterio de impacto ambiental fue evaluado considerando la generación de residuos, el consumo energético y las emisiones de contaminantes del proceso, aspectos clave para cumplir con estándares de sostenibilidad y minimizar la huella ecológica. Se estableció una escala de puntuación: los procesos con alto impacto ambiental, que generaron grandes cantidades de residuos tóxicos, consumieron mucha energía y emitieron contaminantes significativos, recibieron

una puntuación de 1. Los procesos con un impacto moderadamente alto, aunque con menor generación de residuos y consumo energético, obtuvieron una puntuación de 2. Aquellos que generaron residuos controlados y consumieron energía de forma equilibrada se calificaron con 3. Procesos que mostraron eficiencia energética, baja generación de residuos y bajas emisiones de contaminantes alcanzaron una puntuación de 4. Finalmente, los procesos con impacto ambiental mínimo, caracterizados por su sostenibilidad y eficiencia sobresaliente, obtuvieron una puntuación máxima de 5.

El criterio de Tiempo de Proceso evaluó la duración total desde el inicio hasta la obtención del bioplástico. Un tiempo de proceso más corto incrementa la eficiencia y reduce los costos operativos. La escala de puntuación se organizó de la siguiente manera: un tiempo extremadamente largo, superior a 48 horas, representando alta ineficiencia y elevados costos operativos, recibió una puntuación de 1; un tiempo largo, entre 24 y 48 horas, llevó a eficiencia y costos subóptimos, siendo calificado con 2; un tiempo moderado, entre 12 y 24 horas, equilibró de manera aceptable la eficiencia y los costos, obteniendo una puntuación de 3; un tiempo corto, entre 6 y 12 horas, mejoró la eficiencia y redujo significativamente los costos operativos, recibiendo una puntuación de 4; y, por último, un tiempo muy corto, menos de 6 horas, maximizó la eficiencia y minimizó los costos operativos, logrando la puntuación máxima de 5.

El criterio de biocompatibilidad se examinó la compatibilidad del bioplástico con organismos vivos, especialmente si se utiliza en aplicaciones médicas o de contacto con alimentos. La biocompatibilidad asegura que el bioplástico no cause reacciones adversas en organismos vivos. La escala de puntuación se organiza de la siguiente forma: si el bioplástico muestra una biocompatibilidad deficiente, con reacciones adversas significativas en organismos vivos, no apto para aplicaciones médicas o de contacto con alimentos, tiene una puntuación de 1; si tiene una biocompatibilidad limitada, con algunas reacciones adversas, y es solo adecuado para aplicaciones no críticas, tiene una puntuación de 2; si muestra una biocompatibilidad aceptable, con algunas reacciones menores, adecuado para aplicaciones generales pero no para contacto prolongado con alimentos o aplicaciones médicas, tiene una puntuación de 3; si tiene buena biocompatibilidad, con mínimas reacciones adversas, adecuado para aplicaciones de contacto con alimentos y usos no críticos, tiene una puntuación de 4; y finalmente, si exhibe excelente biocompatibilidad, sin

reacciones adversas, y es completamente seguro para aplicaciones médicas y contacto con alimentos, tiene una puntuación de 5.

El costo de producción fue un criterio crucial que evaluó la viabilidad económica del bioplástico en comparación con los plásticos tradicionales. Este aspecto determina si el bioplástico puede competir en el mercado sin afectar su accesibilidad. La puntuación para este criterio se organiza de la siguiente manera: un bioplástico con un costo de producción significativamente superior al de los plásticos convencionales, lo que lo hace económicamente inviable, recibe una puntuación de 1; si tiene un costo moderadamente superior, pero todavía fuera del rango competitivo, se le asigna una puntuación de 2; un bioplástico con costos similares a los tradicionales, pero con una rentabilidad limitada, recibe una puntuación de 3; aquellos con costos ligeramente inferiores a los plásticos convencionales, presentando una opción competitiva en el mercado, obtienen una puntuación de 4; finalmente, los bioplásticos con un costo de producción significativamente inferior al de los plásticos tradicionales, lo que lo hace una opción económicamente viable y competitiva, reciben una puntuación de 5.

En la tabla 6 se presentó una matriz de selección para los métodos de obtención de bioplástico, en la que se consideraron varios criterios fundamentales para determinar la viabilidad y desempeño de cada opción. Los criterios evaluados incluyeron propiedades mecánicas, biocompatibilidad, impacto ambiental, tiempo de procesamiento, propiedades químicas, costo de producción y biodegradabilidad, asignando diferentes pesos a cada uno en función de su relevancia para el proceso. Cada uno de los métodos fue calificado en una escala del 1 al 5, en la que se asignaron puntos según el rendimiento de cada criterio. Posteriormente, se multiplicó la calificación de cada criterio por su peso porcentual correspondiente para obtener el valor ponderado (P). Estos valores ponderados fueron luego sumados para calcular el total ponderado de cada método, lo que permitió realizar una comparación objetiva entre los diferentes enfoques. Este proceso facilitó la selección del método más adecuado, alineado con las necesidades específicas del proceso de producción de bioplástico. Además, se asignaron números a los métodos, lo cual proporcionó una visión más clara y detallada de las opciones disponibles.

Método 1 Acetato de celulosa

Método 2 Nanocelulosa

Método 3 Fermentación directa de biomasa (polihidroxialcanoatos)

Método 4 Polimerización de ácido láctico.

**Tabla 6**

*Matriz de selección de valores ponderados*

Criterios	METODOS								
	Peso %	1	P	2	P	3	P	4	P
Propiedades mecánicas	30 %	5	1.5	4	1.2	4	1.2	5	1.5
Biocompatibilidad	10 %	5	0.5	4	0.4	5	0.5	5	0.5
Impacto ambiental	10 %	4	0.4	4	0.5	3	0.3	4	0.4
Tiempo de proceso	10 %	3	0.3	4	0.4	3	0.3	3	0.3
Propiedades químicas	20 %	4	0.8	4	0.8	3	0.6	4	0.8
Costo de producción	10 %	5	0.5	2	0.2	3	0.3	3	0.3
Biodegradabilidad	10 %	5	0.5	1	0.1	5	0.5	1	0.1
Total	100 %		4.5		3.6		3.7		3.9

**Nota.** En la tabla 6 se realizó la calificación ponderada de los métodos comparados a partir de la matriz de selección

A partir de los resultados obtenidos de la tabla 6 se realizó un análisis en donde mostro que el método uno que correspondió a el acetato de celulosa obtuvo la puntuación más alta con un total de 4,5, destacándose en las propiedades mecánicas, costo de producción, biodegradabilidad y biocompatibilidad, además de un buen desempeño en propiedades químicas. Este método presenta un buen equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad, especialmente en términos de la baja generación de residuos y emisiones. En comparación, el método 4 correspondiente a la polimerización de ácido láctico alcanzó una puntuación de 3,9 con un fuerte desempeño en propiedades químicas y en la biocompatibilidad eficiente. Sin embargo, obtuvo una puntuación

más baja en biodegradabilidad con 1 esto es debido que se degrada lentamente superando los 180 días con respecto a la norma ASTM -6400 según los rangos de calificación para la biodegradabilidad y costo de producción, lo que lo hace menos competitivo en esos aspectos, aunque sigue siendo una opción viable. Por otro lado, los métodos 2 y 3 mostraron un desempeño más desigual. El método 2 obtuvo la puntuación más baja de 3,6, con deficiencias en costo de producción y biodegradabilidad, lo que limita su aplicabilidad. Aunque su impacto ambiental fue bajo, la falta de eficiencia en otras áreas lo hace menos atractivo. El método 3 también presentó una puntuación baja con 3,7 con fortalezas en biocompatibilidad pero debilidades en tiempo de procesamiento y costo de producción, lo que sugiere que, aunque sostenibles en algunas áreas, pueden no ser tan eficientes en términos operativos y económicos. En conclusión, el método 1 se muestra como el más equilibrado y efectivo para la producción de bioplásticos, mientras que los otros métodos presentan áreas específicas que requieren optimización.

Basado en los resultados obtenidos, se siguió la metodología propuesta por Jorge y otros [54] y Yesenia [55] para la elaboración de acetato de celulosa a partir de la cáscara de zapote, donde se acetila la celulosa purificada utilizando una mezcla de ácido sulfúrico y ácido acético, lo que permitió desplazar los radicales internos de los grupos carboxilo antes de su sustitución. Posteriormente, se realizó la sustitución del grupo hidroxilo por el grupo acetilo, dotando al material de nuevas características, como un carácter hidrófobo y una apariencia cristalina, típicas de esta reacción. En una fase final, el material acetilado fue extraído con cloroformo, un solvente orgánico que no altera la estructura del acetato de celulosa. Después, se sometió a secado en estufa y a un proceso de trituración hasta obtener una granulometría de 2 milímetros. La pureza de la celulosa juega un papel crucial en la eficiencia de la acetilación, ya que una mayor pureza se traduce en mejores propiedades mecánicas, como mayor dureza. A diferencia de otros métodos, el proceso de Fisher utiliza anhídrido acético como agente acetilante, lo que acelera la reacción y permite un mayor grado de sustitución, aunque también influye en la degradabilidad del biopolímero.

En el próximo capítulo, se llevó a cabo el desarrollo experimental de los procedimientos analizados en esta sección.

### **3. ELABORAR EL BIOPLÁSTICO A ESCALA LABORATORIO A PARTIR DE LA SELECCIÓN DEL PROCESO MÁS APROPIADO**

Para la producción de bioplástico, se inició con la extracción de la celulosa a partir de la cascara de zapote, por medio del método seleccionado en el capítulo anterior el cual correspondió a la prehidrólisis ácida como la ruta principal, complementada con prehidrólisis alcalina, seguida de un proceso de cloración y blanqueamiento. Este enfoque permitió obtener celulosa pura mediante el método de la Cruz [51].

Una vez obtenida la celulosa pura, se procedió a su transformación en bioplástico utilizando el método de acetato de celulosa, según el procedimiento descrito por Ortega [65]. Se desarrolló un prototipo de bioplástico, el cual fue sometido a una caracterización de sus propiedades mecánicas y químicas, con el fin de compararlo con polímeros de origen sintético. Además, se verificó si las condiciones operativas fueron las más adecuadas para la obtención del bioplástico.

#### **3.1 Modificación de la cáscara de zapote**

En primer lugar, se recolectó la materia prima, específicamente la cáscara de zapote (*Matista cordata*), en el barrio Isabella II de la localidad de Engativá, Bogotá. Este material se sometió a un procedimiento de extracción para su adecuada utilización. Se siguió como base la metodología planteada por Cruz [51], adaptada a las características de la cáscara de zapote siendo la materia prima implementada para la elaboración del bioplásticos debido a su composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos componentes, una vez procesados, permiten la obtención de polímeros naturales que se transforman en bioplásticos. La celulosa, en particular, actúa como el principal precursor en la formación de polímeros, proporcionando las propiedades mecánicas necesarias para un material resistente y biodegradable.

Antes de llevar a cabo el pretratamiento químico para la extracción de celulosa mediante una hidrólisis ácida, se realizó una adecuación de la materia prima. En primer lugar, se efectuó la recolección y selección de la cáscara, con el objetivo de emplear únicamente aquellas que se encontraran en condiciones óptimas. Esto implicó que la materia prima no presentara daños microbiológicos ni maltratos mecánicos, y que estuviera en un estado adecuado de maduración para garantizar la efectividad del proceso.

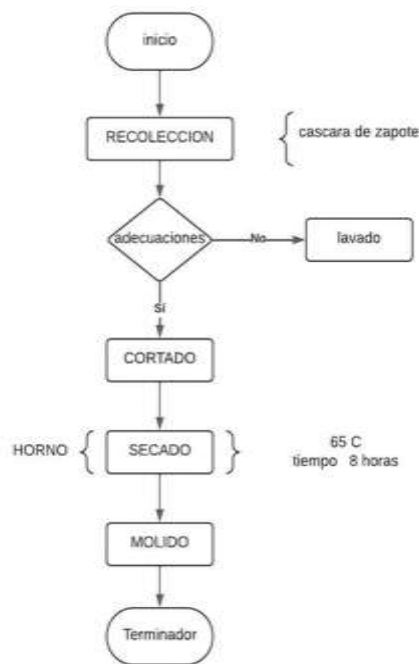
Posteriormente, se procedió a un lavado con agua destilada, con el fin de eliminar los microorganismos que pudieran afectar la celulosa, así como las impurezas y suciedad presentes en

la cáscara. Este paso fue fundamental para evitar la actividad microbiana que podría dañar la corteza del fruto y comprometer la calidad del material. Luego se realizó una reducción de tamaño, cortando la cáscara en trozos pequeños, y se continuó con el proceso.

A continuación en la figura 15, se presenta el diagrama de flujo que detalla cada paso que se llevó a cabo para la adecuación de la materia prima.

### Figura 15

#### *Procedimiento previo al pretratamiento*



**Nota.** La figura 15 representa paso a paso el procedimiento para modificar la cáscara para el posterior pretratamiento.

La humedad de la muestra de cáscara se eliminó utilizando un horno a una temperatura de 65°C durante un periodo de 8 horas. Posteriormente, la cáscara de zapote se molió con un molino manual casero hasta lograr una reducción significativa del tamaño de las partículas. Este proceso permitió aumentar la superficie de contacto, facilitando un medio de extracción más eficiente en el siguiente pretratamiento de hidrólisis ácida.

La figura 16 mostró el resultado obtenido de la materia prima modificada para realizar el posterior pretratamiento, conforme al procedimiento plasmado en la figura 15.

## Figura 16

Modificación mecánica por medio de la reducción



**Nota.** La figura 16 representa el resultado obtenido de la reducción de tamaño del residuos de la cáscara de zapote.

Para la obtención de la celulosa, se inició con el pesaje de 150 g de materia prima previamente sometida a una reducción de tamaño. Luego, se realizó una hidrólisis alcalina con el propósito de eliminar la lignina y la hemicelulosa, obteniendo así una celulosa más pura. Para ello, se utilizaron 240 ml de agua destilada y 10 g de hidróxido de sodio concentrado, logrando una solución alcalina diluida con una concentración a 4,17% p/v como se muestra en la figura 17. La mezcla se colocó en una plancha de calentamiento a 80°C durante un periodo de 2 horas, manteniendo agitación constante para evitar que el material sólido se depositara en el fondo del vaso precipitado.

## Figura 17

### Proceso de hidrólisis alcalina

 <p>Se peso la cáscara de zapote obtenida de la reducción de tamaño.</p>	 <p>Adición de la base diluida a la materia prima para la eliminación de la lignina y hemicelulosa a partir de las cáscaras de zapote con base al diseño de experimentos.</p>	 <p>Se monitoreo y agito de constante.</p>
 <p>Se agito la mezcla y observación del crecimiento</p>	 <p>Monitoreo de RPM y T.</p>	 <p>Finalización del tiempo establecido.</p>
 <p>Al finalizar el proceso de hidrólisis alcalina se midió el pH de la muestra, obteniendo un pH de 12,6</p>		

**Nota.** En la figura 17 se observa el paso a paso del proceso de hidrólisis alcalina para la eliminación de la lignina y hemicelulosa.

La mezcla obtenida del proceso de hidrólisis alcalina se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Una vez enfriada, se realizó una filtración para separar el material sólido de la solución líquida (hidrolizada). El sólido resultante fue neutralizado mediante el lavado con agua destilada, utilizando un total de 20 litros para ajustar el pH a 7.5, garantizando así la neutralización completa de los residuos alcalinos. Como se ve a continuación en la figura 18.

### **Figura 18**

#### *Proceso de filtración*



**Nota.** En la figura 18 se muestra el proceso de filtrado para obtener un pH neutro del material sólido.

El material sólido obtenido después de la filtración fue sometido a un proceso de secado en horno a una temperatura constante de 65°C durante un periodo de 4 horas. Este paso tuvo como objetivo principal eliminar la humedad residual presente en el material, lo cual es crucial para evitar interferencias en las etapas posteriores del proceso. La eliminación adecuada de la humedad también contribuyó a la estabilidad del material y facilitó la manipulación durante su tratamiento posterior. Durante el proceso de secado, la cáscara de zapote fue expuesta a calor controlado, lo que permitió reducir su contenido de agua sin comprometer la integridad estructural de la celulosa extraída.

En la figura 19 se muestra el resultado de la cáscara de zapote después de haber sido expuesta al calor en el horno, dejando el material listo para continuar con las siguientes fases del proceso de extracción y modificación de la celulosa.

## Figura 19

### Proceso de secado

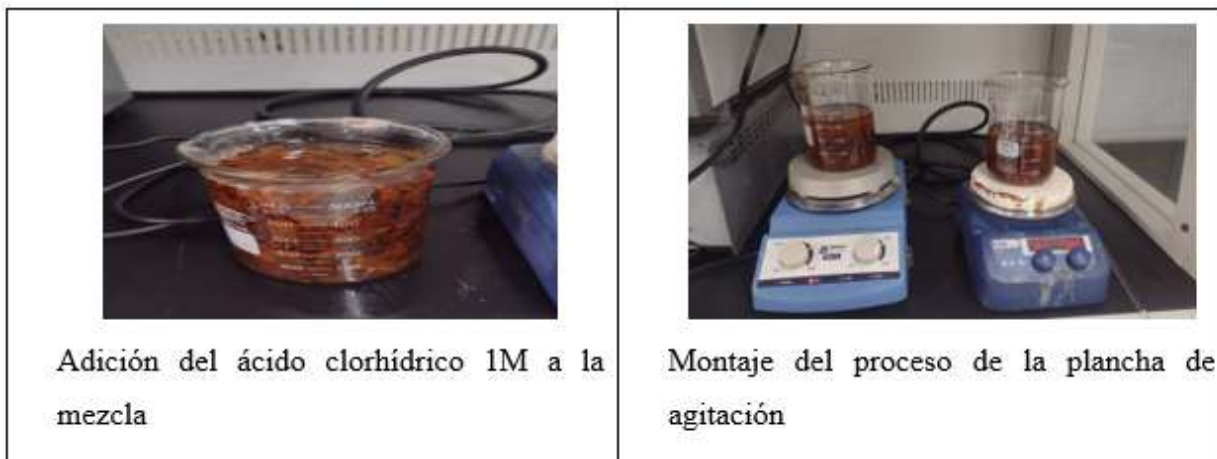


**Nota.** En la figura 19 se muestra el resultado del proceso de secado del material sólido previamente neutralizado a una temperatura de 65°C en un periodo de 4 horas.

El producto obtenido tras el proceso de secado se sometió a una hidrólisis ácida con el objetivo de purificar aún más la celulosa. Para ello, se utilizaron 500 ml de ácido clorhídrico 1M 3,65% p/v, manteniendo la mezcla a una temperatura de 80°C. Durante las 2 horas que duró el proceso, se aplicó agitación constante para evitar que el material sólido se depositara en el fondo, asegurando así una hidrólisis uniforme como se puede apreciar en la figura 20.

## Figura 20

### Proceso de la hidrólisis ácida



**Nota.** En la figura 20 se muestra el proceso de la hidrólisis ácida por medio del montaje en la plancha de agitación

Posteriormente, se procedió a la neutralización de la muestra ácida obtenida tras la hidrólisis, utilizando un total de 16 litros de agua destilada. Este proceso permitió ajustar el pH a 7.5, logrando así un nivel neutro y asegurando que el material estuviera listo para las siguientes etapas de procesamiento. En la figura 21 se muestra el montaje realizado para el proceso de filtración de la muestra posteriormente hidrolizada.

### **Figura 21**

*Proceso de filtración*



**Nota.** En la figura 21 se muestra el proceso de neutralización con agua destilada

Una vez obtenido el material sólido neutralizado, se procedió a una cloración utilizando 200 ml de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) al 5% con el objetivo de eliminar los componentes no deseados, como restos de lignina y otros compuestos orgánicos que pudieron haber permanecido tras la hidrólisis ácida. Este proceso de cloración es fundamental para mejorar la pureza de la celulosa, contribuyendo a su decoloración y a la eliminación de impurezas residuales. La mezcla se sometió a una temperatura controlada de  $50^{\circ}\text{C}$  en baño maría, manteniendo agitación constante durante una hora para asegurar una distribución uniforme del reactivo y una acción eficaz de la cloración como se muestra en la figura 22. El proceso se continuó hasta alcanzar un pH de 9, lo cual garantiza una alcalinidad suficiente para la reacción sin comprometer la integridad de las fibras de celulosa.

## Figura 22

### Proceso de cloración



*Nota.* En la figura 22 se muestra el proceso de cloración y montaje en el baño maría durante un periodo de 1 hora a una temperatura de 50°C con un monitoreo de pH y temperatura.

Al finalizar el proceso de cloración, se lleva a cabo un filtrado utilizando 2 litros de agua destilada para eliminar cualquier residuo de hipoclorito de sodio. Este procedimiento continuo hasta alcanzar un pH 7 neutro, asegurando así la completa eliminación de impurezas y la preparación del material para las etapas siguientes del proceso.

A continuación, en la figura 23 se observó el material solido neutralizado después de que realizo el filtrado con agua destilada.

## Figura 23

### Proceso de filtración

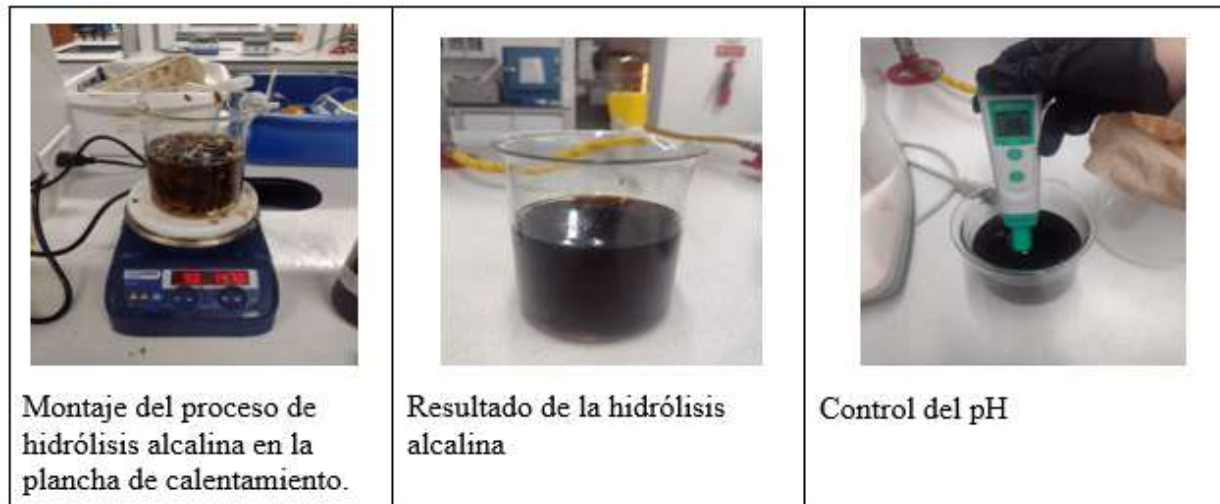


*Nota.* En la figura 23 se observa el producto después del proceso de filtración

Se llevó a cabo una segunda hidrólisis alcalina con el objetivo de eliminar las impurezas restantes que no fueron completamente removidas en las etapas previas. Este paso fue fundamental para obtener una celulosa más pura y de alta calidad, asegurando que sus propiedades se mantuvieran en óptimas condiciones. La purificación adicional resultó esencial para mejorar la funcionalidad y la versatilidad de la celulosa en aplicaciones posteriores. Para este procedimiento, se emplearon 300 ml de una solución de NaOH al 25 % , que se mantuvo a una temperatura de 90 °C durante 1 hora, con agitación constante para garantizar la homogeneidad del tratamiento y la eficacia del proceso. El proceso de hidrólisis alcalina fue ilustrado a continuación en la figura 24.

### Figura 24

*Proceso de hidrólisis alcalina*

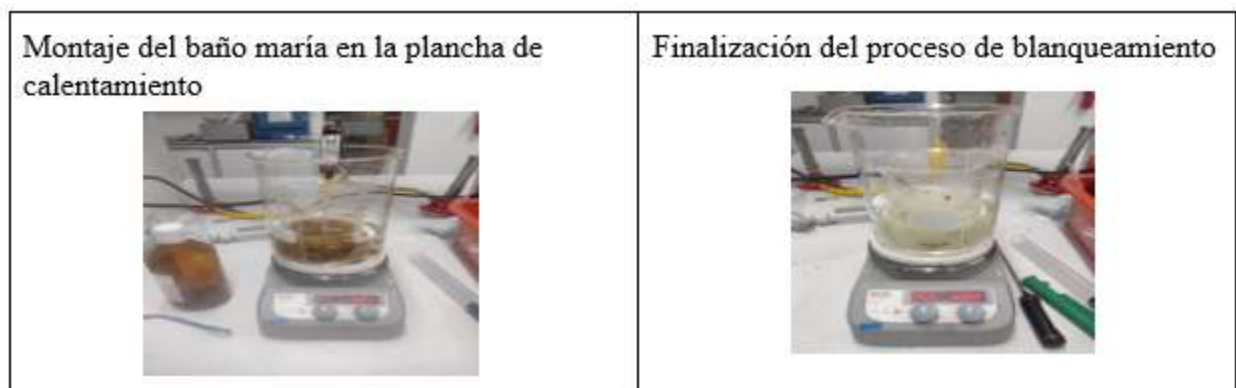


**Nota.** En la figura 24 se realizó el segundo proceso de hidrólisis alcalina para retirar las últimas impurezas presentes en el material sólido y obtener una celulosa más pura.

El material sodio obtenido de la hidrólisis presenta un pH 12.6 y es neutralizado por medio de 15 litro de agua desionizada hasta obtener un pH 7.6. El material sólido neutralizado se somete a un blanqueamiento con 200 ml hipoclorito de sodio al 1 % para eliminar las impurezas restantes y garantizar que la celulosa obtenida sea adecuada para su posterior uso en diversas aplicaciones industriales. Para llevar a cabo este proceso, se realiza un montaje en baño maría como se muestra en la figura 25 a una temperatura de 70 °C durante 1 hora.

## Figura 25

### *Proceso de hidrolisis alcalina*



**Nota.** En la figura 25 se muestra el proceso de blanqueamiento, el montaje de baño maría y el control de la temperatura y agitación.

A la muestra obtenida se le midió el pH dando 5.8 y luego del proceso de blanqueamiento se neutralizó el pH a 7.0 con 1L de agua destilada previamente calentada , en la figura 26 se observa el material celulosa obtenido después de realizar el proceso de neutralización por medio de la filtración.

## Figura 26

### *Celulosa obtenida del blanqueamiento*



**Nota.** La figura 26 representa el resultado obtenido de la celulosa después de la filtración y neutralización.

Por último, se llevó a cabo un proceso de secado a 65°C durante un periodo de 12 horas. Una vez completado, el material fue envasado en frascos herméticos y almacenado en un desecador para preservar sus propiedades hasta su posterior uso. En la imagen 27 se observó el resultado final del

material después del secado, evidenciando su aspecto homogéneo y libre de humedad, listo para las siguientes etapas del proceso.

### **Figura 27**

#### *Secado celulosa*



**Nota.** En la figura 27 se evidencia el resultado obtenido tras el proceso de secado de la celulosa extraída de la cáscara de zapote, el cual se llevó a cabo a una temperatura constante.

Después de finalizar el pretratamiento, se procedió a iniciar la síntesis del acetato de celulosa mediante una adaptación de la metodología de Ortega [65]. Esta metodología, originalmente aplicada a residuos de piña, fue adaptada para ajustarse a las características específicas de la celulosa obtenida de la cáscara de zapote.

### **Figura 28**

#### *Proceso de pesado*



**Nota.** En la Figura 28 se muestra el proceso del pesaje de la celulosa previamente tratada y purificada.

Durante esta etapa, se utilizó una balanza analítica para medir con precisión los 6,2 g de celulosa necesarios para iniciar el proceso de elaboración del bioplástico, como se aprecia en la figura 28. Posteriormente, se realizó una agitación constante en una placa de agitación, donde se controló la temperatura a 39.5 °C durante un período de 1 hora. Este proceso garantizó la homogeneidad de la mezcla y favoreció la disolución completa de la celulosa en el ácido acético.

A continuación, se agregaron 40 ml de ácido acético glacial 98% , y con la ayuda de una micropipeta, se añadieron 0.08 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a la mezcla, manteniendo una agitación constante durante 45 minutos. En la figura 29 se evidencia el montaje experimental sobre una plancha de agitación, donde se encontraba la mezcla de ácido acético glacial y ácido sulfúrico. Este equipo fue fundamental para asegurar una agitación uniforme y homogénea de la solución, lo que facilitó la reacción de acetilación de la celulosa y garantizó la efectividad del proceso.

### **Figura 29**

*Montaje de plancha de agitación.*



**Nota.** En la figura 29 se muestra el montaje de plancha de agitación

Al finalizar el proceso se midió la temperatura a la mezcla obteniendo una temperatura 35°C donde se buscó llegar a 18.3°C por medio de un proceso de enfriamiento y se añadieron 28 ml de anhídrido acético y 0.6ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). La mezcla obtenida se expuso a una elevación de temperatura a 35°C y una agitación constante durante 1.5 h.

Seguido se añadió una solución de 10 ml de agua y 20 ml de ácido acético glacial 66.67 % v/v en pequeñas porciones durante 1 h bajo agitación.

Finalmente, el material se dejó en agitación durante 24 horas, como se muestra en la figura 30 y posteriormente se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro (7.0).

### **Figura 30**

#### *Proceso de agitación*



**Nota.** En la figura 30 se evidencia el proceso de agitación continuo de la muestra por un periodo de 24 horas.

Para finalizar, se llevó a cabo un proceso de secado durante 6 horas, con el objetivo de obtener una lámina de acetato de celulosa completamente formada y lista para su posterior caracterización. Este paso fue crucial para garantizar que el material alcanzara la consistencia y estabilidad necesarias, eliminando cualquier residuo de humedad que pudiera interferir en las etapas de análisis posteriores.

El secado permitió obtener una lámina uniforme, en la figura 31 se presenta el resultado final de la lámina de acetato de celulosa, lista para someterse a pruebas de caracterización, como análisis de propiedades mecánicas y químicas, para evaluar su idoneidad como bioplástico en aplicaciones específicas. Este producto representó el resultado final del proceso.

### **Figura 31**

*Lamina de acetato de celulosa*



*Nota.* En la figura 31 se observa el resultado final del proceso con la obtención de bioplástico de cascara de zapote.

Este capítulo se detalló de manera específica la descripción de las etapas realizadas para la obtención y modificación de celulosa, así como la síntesis inicial del bioplástico. Los procedimientos y resultados aquí presentados establecieron la base para continuar con el desarrollo del proyecto. En el próximo apartado se abordara los resultados obtenidos para el cumplimiento del tercer objetivo, enfocado en la caracterización del bioplástico y la evaluación de sus propiedades mecánicas y químicas.

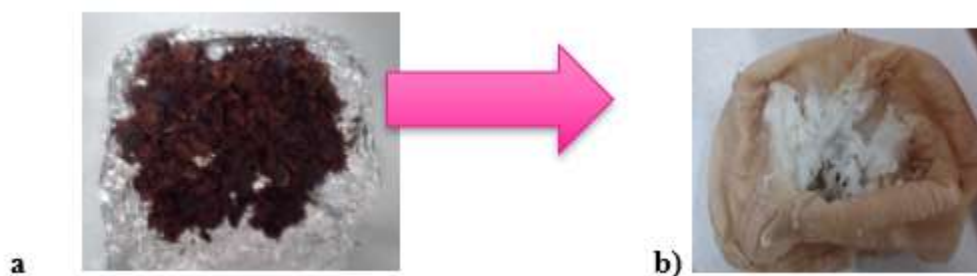
#### 4. CARACTERIZAR EL BIOPLÁSTICO ELABORADO A PARTIR DE LA CÁSCARA DEL ZAPOTE VALIDANDO SU APLICABILIDAD

Se llevó a cabo la caracterización del bioplástico mediante la determinación de sus propiedades mecánicas y químicas el espesor, humedad, la permeabilidad al vapor de agua, la solubilidad en agua, la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, deformación de ruptura y la biodegradabilidad. Para esto, se aplicaron las fórmulas establecidas en el marco teórico y se emplearon diversos métodos de prueba según las normas ASTM.

##### 4.1 Prueba visual de la celulosa obtenida

###### Figura 32

*Prueba visual de la celulosa*



*Nota.* En la figura 32 se evidencia la transformación de la biomasa inicial (a) a la celulosa extraída (b).

La evaluación visual de la celulosa permitió una verificación de la calidad del material extraído. Se analizaron aspectos físicos clave como color, textura y homogeneidad, los cuales indican el grado de purificación y posible presencia de impurezas.

En la imagen a. se evidencia la primera etapa del proceso donde está la biomasa inicial, caracterizada por un color marrón oscuro, lo cual indica la presencia de lignina y otros posibles componentes no celulósicos. La textura es fibrosa y compacta, reflejando la estructura original de la materia prima (matitas cordata).

En la imagen b. se evidenció la aplicación de los tratamientos químicos y mecánicos correspondientes descritos en la metodología del capítulo anterior. Resultado del proceso de purificación mediante la hidrólisis alcalina, neutralización y blanqueamiento, se obtuvo una celulosa purificada, la muestra presenta un color generalmente uniforme, siendo característico de

una celulosa con alta pureza. La textura obtenida es más ligera, fibrosa y desagregada, evidenciando la eliminación de lignina, hemicelulosa e impurezas. La falta de compactación indica que la matriz lignocelulósica fue desintegrada adecuadamente.

#### 4.2 Prueba del espesor

La medición del espesor del bioplástico se realizó en unidades de milímetros (mm) utilizando un micrómetro digital con una resolución de 1  $\mu\text{m}$ . El resultado se expresó como el promedio de 5 mediciones tomadas aleatoriamente sobre las probetas de bioplástico, previamente cortado y preparado para el ensayo. En la tabla 8 se expresa los espesores obtenidos a partir de las diferentes muestras.

**Tabla 7**

Prueba de espesor

Muestra	Espesor (mm)
1	0.174
2	0.165
3	0.186
4	0.178
5	0.167
<b>Promedio</b>	0.174

*Nota.* En la tabla 7 se plasmaron los diferentes espesores.

Los resultados obtenidos para el espesor de las muestras presentaron un rango entre 0.165 y 0.186 mm, con un promedio de 0.174 mm, como se muestra en la Tabla 7 la muestra número tres fue la que presentó mayor grosor, aunque la variación en el espesor entre las diferentes muestras fue mínima. Los espesores se mantuvieron en un rango consistente. Se observa que los valores obtenidos para el espesor del bioplástico se encuentran dentro de un rango aceptado según las normativas NTC ISO 4593 y NTC 1700. Estas normas establecen que el espesor aceptable para este tipo de material debe ser menor a 0,2 mm . Al comparar los resultados de nuestras muestras con estas especificaciones, podemos afirmar que cumplen con los estándares establecidos, permitiendo validar el análisis bajo criterios normativos reconocidos y asegurando que el espesor del bioplástico se ajusta a los requisitos de calidad indicados en las normativas [66].

### 4.3 Prueba de humedad

La determinación de la prueba de humedad se realizó basada en la norma ASTM D871-82 titulada "Standard Test Method for Moisture Analysis of Cellulose Acetates", la cual consiste en realizar un secado de la muestra y obtener un porcentaje por diferencias entre en peso inicial y el peso final.

En primer lugar, se empleó un crisol previamente tarado mediante un proceso de calentamiento durante 2 horas. Una vez calentado, se colocó en un desecador para permitir su enfriamiento y posteriormente se pesó vacío con precisión. A continuación, se añadieron 1.024 gramos de bioplástico al crisol, el cual fue introducidos en un horno a temperatura 105 °C controlada durante un periodo de 24 horas para eliminar la humedad presente en el material. Tras completar el tiempo de secado, el crisol con el bioplástico fue trasladados nuevamente al desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Finalmente, se efectuó el pesaje del crisol con el bioplástico seco, lo que permitió determinar la pérdida de peso atribuida al contenido de humedad inicial. Este procedimiento asegura resultados precisos en la evaluación de la humedad del bioplástico, cumpliendo con los estándares establecidos por la norma. Los datos obtenidos de la prueba de humedad se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Prueba de humedad*

	Peso del crisol con bioplástico	Peso del bioplástico	Peso crisol con bioplástico seco	Bioplástico seco	Humedad %
MUESTRA	39.755	1.024	40.794	0.636	37.89

*Nota.* En la tabla 8 se diligenciaron los respectivos valores para obtener el porcentaje de humedad

En términos de contenido de humedad en bioplásticos, el bioplástico elaborado a partir de cáscara de zapote presentó un valor de 37.89%. Dada la falta de evidencia en estudios específicos sobre bioplásticos a partir de cáscara de zapote. Se tomó como referencia la investigación de Ruiloba [67], la cual reportó una humedad de  $(33.5\% \pm 0.8)$  para un bioplástico a base de cáscara mango. Es importante tener en cuenta que un mayor porcentaje de humedad en los bioplásticos generalmente favorece el desarrollo de flora bacteriana, lo cual afectaría sus propiedades y reducir su durabilidad[67].

#### 4.4 Prueba de solubilidad

Para evaluar la solubilidad en agua de un bioplástico, se siguió la metodología de Gontard [35], con algunas adaptaciones. El bioplástico fueron pesado utilizando la balanza, la muestra se sumergió en un tubo de ensayo con 10 ml de agua destilada como se muestra en la figura 33 . La muestra se agito a 25°C durante 24 horas. Posteriormente, se utilizó papel filtro para retirar el agua. Luego, se colocó en una estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas para eliminar la humedad residual y se dejó enfriar en un desecador, se pesó el bioplástico seco. Se determinó el peso del material solubilizado. [32]

#### Figura 33

*Prueba de solubilidad*



*Nota.* En la figura 33 se muestra la prueba de solubilidad en agua destilada

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de solubilidad del bioplástico elaborado a partir de cáscara de zapote, calculados mediante la ecuación 5 de solubilidad, la cual se encuentra descrita en el primer capítulo.

#### Tabla 9

Prueba de solubilidad

	PESO DEL BIOPLASTICO	PESO DEL BIOPLASTICO SECO	SOLUBILIDAD %
MUESTRA	0.135	0,066	51.11

*Nota.* En la tabla 9 se encuentran los valores correspondientes para el cálculo de porcentaje de solubilidad

En la Tabla 9 se presenta el valor de solubilidad del bioplástico obtenido a partir de cáscara de zapote. Este valor fue comparado con los reportados por M. Cruz y colaboradores [70], quienes

informaron la solubilidad de bioplásticos derivados de trigo y cebada, con rangos de 54.52-60.94% y 44.05-50.77%, respectivamente. Según sus hallazgos, un bioplástico con un valor de solubilidad inferior al 70% puede ser utilizado como recubrimiento soluble en cápsulas medicinales. En este sentido, el bioplástico a partir de cáscara de zapote presentó una solubilidad de 51.11%, lo que indica que se encuentra dentro de este rango. Sin embargo, este valor limita su uso en el sector alimentario, ya que la exposición a la humedad o a líquidos podría degradar su estructura y comprometer la integridad del producto en contacto. Por lo tanto, aunque el bioplástico obtenido de cáscara de zapote muestra potencial como recubrimiento en aplicaciones médicas, su solubilidad representa un desafío para su implementación efectiva en la industria alimentaria.

#### **4.5 Prueba de permeabilidad**

Para determinar la permeabilidad del bioplástico se estipuló gravimétricamente a 25°C basados en la norma ASTM E96-80 (American society for testing and materials)[30] con modificaciones por Gontard [35] y Vicentini [34]. Se cortó la película de bioplástico de forma circular con un diámetro de 30 mm fue colocado en un tubo de ensayo, con agua destilada, actuando como barrera entre el agua y el ambiente exterior. Luego se colocaron el tubo de ensayo en desecadores con sílice, almacenados a 25°C, se determinando la cantidad de agua que se había evaporado cada hora en un periodo de 6 h a través de una balanza. En la tabla 10 se presentan los valores obtenidos del desarrollo de la ecuación 2 denominada de prueba de permeabilidad expuesta en el marco teórico. (Anexo 3)

**Tabla 10**

*Prueba de permeabilidad*

TIEMPO (HORAS)	PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (g/h.m.Mpa)
	MUESTRA
1	0.0032
2	0.0012
3	0.0008
4	0.0091
5	0.0002
6	0.0002
PROMEDIO	0.00245

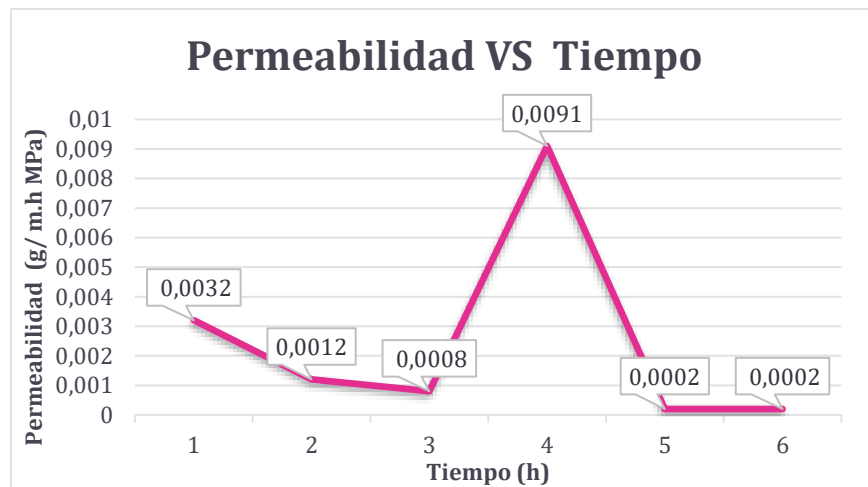
*Nota.* En la tabla 10 se plasmaron los valores de permeabilidad calculados con respecto al tiempo

La Tabla 10 se muestra los valores de permeabilidad al vapor de agua en función del tiempo de exposición. Se obtuvieron 6 mediciones correspondientes a cada hora de exposición, y al final se calculó el promedio de permeabilidad, resultando en un valor de 0,00245 g/h.m.Mps.

A continuación, en la figura 34 se plasmaron los resultados de la tabla 10.

**Figura 34**

*Permeabilidad vs Tiempo*



*Nota.* En la figura 34 se representa la permeabilidad de vapor vs el tiempo

En la Figura 34 se presentó una representación gráfica de los datos de la Tabla 11, lo que permitió visualizar de forma clara los resultados obtenidos. Durante la cuarta hora, se observó un pico

máximo de permeabilidad al vapor de agua, con un valor de 0,0091 g/(m<sup>2</sup>·h·MPa). Según lo reportado por Ali Abdulkhani y colaboradores [72], esto se debió a que, al tratarse de un material celulósico, presentó baja resistencia a la absorción debido a la presencia de grupos polares que atraen las moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno. Este fenómeno condujo a una acumulación de humedad en la pared celular de las fibras (hinchamiento de las fibras), así como en las interfaces de las microfibrillas. Este hinchamiento, aunque responsable de los cambios dimensionales en las muestras, fue reversible. A partir de la quinta hora, los valores de permeabilidad se estabilizaron.

Para llevar a cabo las pruebas mecánicas, se fabricaron y acondicionaron probetas a partir del bioplástico obtenido. Estas probetas se diseñaron siguiendo dimensiones específicas: 60 mm de largo y 15 mm de ancho, garantizando la uniformidad requerida para su evaluación en la máquina universal de ensayos.

#### **4.6 Prueba de tracción y elongación**

La prueba de tracción se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM . Para ello, se implementaron las probeta previamente fabricadas a partir de la película de bioplástico. Durante el ensayo se evaluaron los parámetros mecánicos claves como la deformación ,la tracción, incluyendo el módulo de elasticidad, utilizando una equipo de ensayos universal marca Shimadzu. Modelo AGS-50KNX. Modelo de mesa de dos columnas con marco de carga de 50 KN de capacidad y sus accesorios. Se utilizó una velocidad de desplazamiento de 250 mm/min y una fuerza de 10 KN.

### Figura 35

*Equipo para ensayo de atracción*



**Nota.** En la figura 35 se muestra el equipo con el que se realizan las pruebas mecánicas

Durante los ensayos de tracción, se evaluaron los siguientes parámetros: Esfuerzo máxima, deformación de ruptura y módulo de Young. Estos parámetros son fundamentales para caracterizar las propiedades mecánicas del bioplástico y su desempeño bajo tensión. En total, se realizaron 3 ensayos con el fin de obtener un promedio respectivo de las propiedades mecánicas evaluadas. Los resultados obtenidos de estas pruebas se resumen en la tabla 11 donde se presentan los valores medidos par cada parámetro. Para el cálculo de módulo de Young se utiliza la ecuación 4 descripta previamente en el marco teórico, que relaciona el esfuerzo y la deformación en la región elástica. De manera similar, la ecuación 5, también referenciada en el marco teórico, fue empleada para determinar la deformación de ruptura.

**Tabla 11**

*Prueba de tracción*

MUESTRA	MODULLO DE ELASTICIDAD (MPa)	ESFUERZO MAXIMO (MPa)	DEFORMACION DE RUPTURA (%)
1	23.67 ± 2.13	2.56	43.56 ± 2.2
2	21.24± 0.85	2.38	41.79 ± 1.84
3	24.04± 1.89	2.73	44.59 ± 0.57
PROMEDIO	22.98	2.55	43.31

**Nota.** En la tabla 11 se plasmaron los valores de las pruebas mecánicas realizadas.

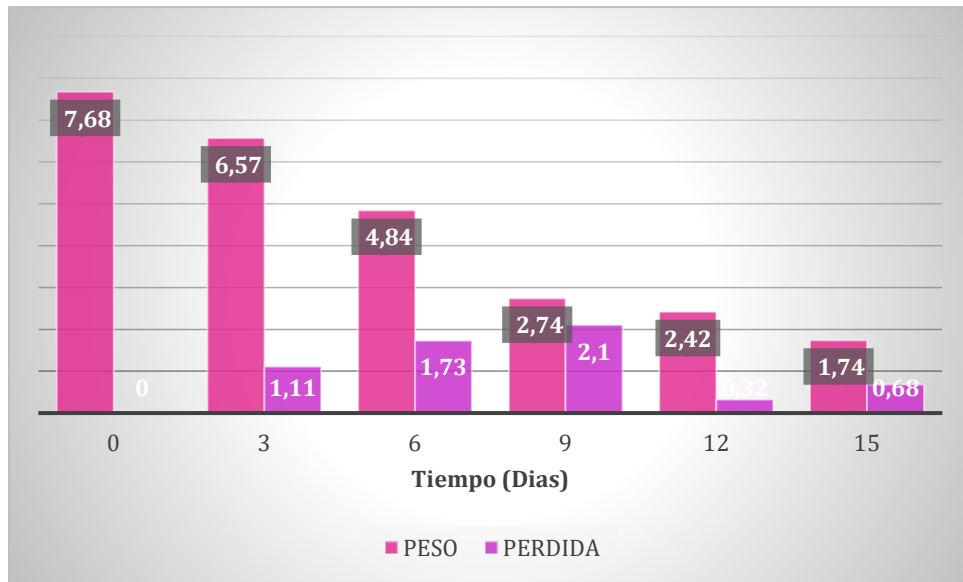
A partir de los datos presentados en la Tabla 11, se llevó a cabo un análisis de las propiedades del bioplástico siguiendo los criterios establecidos en la norma ASTM D-638 [73]. Esta norma define rangos específicos para clasificar los materiales en función de sus propiedades mecánicas, lo que permitió categorizar el bioplástico obtenido. En relación con el módulo de elasticidad, el bioplástico mostró un valor de 22,98 MPa, clasificado como un elastómero, dado que los materiales con valores inferiores a 100 MPa pertenecen a esta categoría. Este resultado indica que el material tiene una capacidad significativa para deformarse bajo una carga sin fracturarse, lo cual es característico de los elastómeros. Por otro lado, en cuanto a su comportamiento a la tracción, se obtuvo un valor de 2,55 MPa, lo que también lo clasifica como un elastómero y un material flexible, al encontrarse dentro del rango especificado para este tipo de materiales (2-10 MPa). Este valor resalta la capacidad del bioplástico para soportar esfuerzos de tracción antes de alcanzar su límite de resistencia. Finalmente, la deformación de ruptura presentó un valor de 43,31%, lo que lo ubica dentro del rango correspondiente a materiales flexibles (20-500%). Este dato refleja la alta capacidad del bioplástico para estirarse considerablemente antes de romperse, lo que refuerza su clasificación como un material flexible y con aplicaciones potenciales en situaciones que requieran resistencia a la deformación. Este análisis resalta que las propiedades obtenidas posicionan al bioplástico como un elastómero con buena flexibilidad.

#### **4.7 Biodegradabilidad**

El bioplástico de cáscara de zapote presenta una descomposición significativamente más rápida en comparación con los Polietileno (PE), Polipropileno, (PP)Poliestireno, (PS)Policloruro de vinilo (PVC), posicionándose como una alternativa ecológica ideal para diversas industrias. Para evaluar su biodegradabilidad se siguió la metodología de Charro [43] con algunas adaptaciones, el bioplástico fue sometido a mediciones periódicas de pérdida de masa para reflejar las condiciones de biodegradabilidad, realizadas cada 3 días, observándose su disminución en peso a lo largo del tiempo. Este seguimiento detallado del cambio de masa permite verificar su capacidad de descomposición y resalta su potencial en la reducción de residuos plásticos de larga duración como se puede observar en la figura 36.

**Figura 36**

*Prueba de biodegradabilidad*



**Nota.** En la figura 36 se representa la pérdida de peso con respecto al tiempo

En la figura 36 se observa el proceso de degradación del bioplástico, registrando la pérdida de peso y el diferencia del peso inicial con la variación en el tiempo. Donde el día nueve presento una mayor pérdida de peso con respecto a los otros días, indicando que presenta una aceleración significativa en su descomposición. Para el día 15 del bioplástico presento una pérdida de peso significativa, verificando que presenta una degradabilidad a temperatura ambiente a partir de eso se cumplido con la norma ASTM 6400 en donde se expresa que el bioplástico debe tener una descomposición antes de 180 días

**Tabla 12**

*Porcentaje de biodegradabilidad*

<b>DIAS</b>	<b>BIODEGRADABILIDAD( %)</b>
3	14.45
6	26,33
9	43,39
12	11,68
15	28,09

**Nota.** En la tabla 12 se plasma el porcentaje de biodegradabilidad con respecto al tiempo

En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de pérdida de peso del bioplástico en función de los días de seguimiento, obtenidos de la ecuación 6 plasmada en el marco teórico, lo que permite analizar su estabilidad y comportamiento de degradación a lo largo del tiempo. El día con la mayor pérdida de masa fue el 9, alcanzando un porcentaje del 43.39%, seguido del día 15, con una pérdida adicional del 28.09%. Estos resultados indican una degradación significativa en el periodo inicial, acumulando una pérdida total del 77.3% desde el inicio hasta el día 15. Este análisis sugiere que el bioplástico experimenta una alta tasa de pérdida de masa en las primeras dos semanas, debido a la exposición de al aire y los microorganismos aerobios que ayudan a degradar la película con liberación de CO<sub>2</sub>. En la figura 37 se ve el resultado del día 15 con una descomposición de 77.3%.

**Figura 37**

*Bioplástico en descomposición.*



**Nota .** En la figura 37 se observa el bioplástico de zapote en su periodo de descomposición.

Estos datos resultados ayudaron a comprender la estabilidad del bioplástico y estimar su durabilidad en aplicaciones prácticas. La integración de propiedades químicas, como la permeabilidad al vapor de agua y la solubilidad, junto con las propiedades mecánicas, como el

módulo de elasticidad y la deformación de rotura, proporciona una visión de su comportamiento frente a diferentes condiciones. Esta evaluación permite anticipar su desempeño en diversos escenarios, asegurando que el material cumpla con los requisitos de sostenibilidad y funcionalidad necesarios para competir como una alternativa viable frente a los plásticos convencionales.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo del bioplástico a partir de cascara de zapote, con el fin de evaluar el desempeño del proceso y la calidad del producto final.

En la extracción de celulosa de los residuos de la cascara de zapote con la combinación de los procesos de hidrólisis acida y básica, se logró obtener un rendimiento del 4.13 %, no obstante en investigaciones que utilizaron la misma materia prima de Gloria Ortiz (2006)[7],” Evaluación de la calidad de la fibra de los subproductos del fruto del zapote (*Matisia cordata*) y su aplicación en la elaboración de producto fibroso. Obtuvieron un rendimiento de 41.17% de tal manera que permitió evidenciar que el rendimiento obtenido del proyecto es de un 10,03 %, esto sugiere una ineficiencia significativa, una de las razones son las perdida durante los procesos de lavado, neutralización, filtración y secado

Eficiencia de la celulosa experimental:

$$\% \text{ Rendimiento experimental} = \frac{\text{celulosa seca}}{\text{biomasa inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Rendimiento experimental} = \frac{6.2 \text{ g}}{150 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ Rendimiennto experimental} = 4.13\%$$

Se consulto el rendimiento teórico de la extracción celulosa a partir de la cascara de zapote en la investigación de Gloria Ortiz obteniendo un valor aproximado 41,17% [7]

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{4.13}{41.17} * 100$$

$$\% \text{ Eficiencia} = 10,03\%$$

La acetilación de la celulosa a partir de la celulosa extruida de la cascara de zapote presento un rendimiento de 90.32 % un valor cercano a lo reportado en la investigación realizada con pasto común( *Festuca arundinacea*) por Yessenia guerrero [55] en donde se obtuvo un rendimiento de 92,08%. El rendimiento logrado en este trabajo registra que de los 10 g de celulosa extraída

utilizada para la elaboración del proceso de acetilación se pierden un promedio de 0.792 g de celulosa durante todo el proceso generalmente esta pérdida ocurre con el proceso de filtración.

La muestra de acetato de celulosa alcanzó un porcentaje de humedad del 37.89%, lo que indica un alto contenido de agua. Esto puede afectar negativamente sus propiedades mecánicas, reduciendo su rigidez y rendimiento. Además, una humedad elevada puede favorecer el crecimiento microbiano o generar reacciones de degradación, comprometiendo la durabilidad y estabilidad del material a largo plazo. En comparación con el acetato de celulosa comercial, cuyo contenido de humedad suele estar entre 0.5% y 2% después del proceso de secado, este valor es significativamente alto impactado en la calidad del producto [73].

Por otro lado, la solubilidad obtenida fue del 51.11%, lo que indica que el acetato de celulosa derivado de cáscara de zapote no es completamente soluble en agua. Esto sugiere que posee un grado de sustitución (GS) intermedio, es decir, una acetilación parcial que influye en su capacidad de disolución. En comparación, el acetato de celulosa comercial generalmente presenta un GS entre 2.5 y 2.9, lo que le confiere una mayor solubilidad en solventes orgánicos como la acetona o el acetato de etilo, pero una limitada solubilidad en agua[74].

La permeabilidad de vapor de agua del bioplástico obtenido fue de un promedio de  $2,45 \times 10^{-3}$  g/h.m.Mpa lo que indica que este material permite el paso de una cantidad considerable de vapor. En comparación, el acetato de celulosa comercial presenta una permeabilidad mucho menor, con un valor de  $5 \times 10^{-7}$  g/(h·m·MPa), lo que lo convierte en una barrera significativamente más eficaz contra la transmisión de humedad. Por otro lado, la biodegradabilidad del acetato de celulosa obtenido a partir de la cáscara de zapote es acelerada en comparación con la del acetato de celulosa comercial. Esto se debe a que el grado de sustitución en el material comercial es mayor, lo que limita su degradación. La presencia de grupos acetilo en el polímero reduce la absorción de agua y la acción de microorganismos, retrasando su descomposición en ambientes naturales. En cambio, el bioplástico elaborado a partir de cáscara de zapote presenta una mayor susceptibilidad a la degradación debido a un menor grado de sustitución, lo que facilita su descomposición en condiciones ambientales[74].

Los valores obtenidos de las pruebas mecánicas del acetato de celulosa a partir de cascara de zapote fueron 22.98 Mpa para el módulo de elasticidad en comparación con el acetato de celulosa

comercial, estos valores son considerablemente menores. El acetato de celulosa comercial típicamente exhibe un módulo de elasticidad en el rango de 1 a 4 GPa (1000 a 4000 MPa) y asimismo, la resistencia a la tracción obtenida fue 2.55 Mpa, un valor significativamente menor al acetato comercial, que generalmente oscila entre 12 y 110 MPa, lo que indica que el bioplástico obtenido es más flexible pero menos resistente mecánicamente. El alto porcentaje de deformación a la ruptura del bioplástico que es de 43.31% sugiere que es más dúctil en comparación con el acetato de celulosa comercial, que suele presentar valores de elongación a la ruptura entre 5 y 30%, dependiendo de su grado de plasticidad[74].

En resumen, los resultados obtenidos en este proyecto respaldan la hipótesis sobre el desarrollo del bioplástico a partir de cáscara de zapote permitió evaluar la eficiencia del proceso de extracción de celulosa y su posterior acetilación. Los resultados obtenidos evidenciaron una baja eficiencia en la recuperación de celulosa (10.03%) en comparación con estudios previos, lo que sugiere que las pérdidas durante las etapas de lavado, neutralización, filtración y secado afectaron significativamente el rendimiento final. Sin embargo, la acetilación de la celulosa mostró un alto porcentaje de conversión (90.32%), similar a lo reportado en la literatura para otras fuentes de biomasa, lo que indica que el proceso es viable.

## 6. CONCLUSIONES

La selección de la hidrólisis ácida como método de pretratamiento para la producción de bioplástico a partir de cáscara de zapote resultó ser la alternativa más adecuada, obteniendo una puntuación de 4.3 según la matriz de decisión utilizada. Este método facilita de manera eficiente la extracción de celulosa, materia prima clave para la posterior elaboración de bioplásticos. En cuanto al proceso de producción, el acetato de celulosa también obtuvo una puntuación de 4.5, consolidándose como la opción óptima para transformar la celulosa extraída en bioplástico.

El proceso escogido como pretratamiento de hidrólisis ácida no resultan viables en términos de rendimiento de extracción, ya que el porcentaje obtenido es significativamente menor en comparación con el valor teórico. Sin embargo, el proceso de acetilación compensa esta limitación, ya que presenta un alto rendimiento y permite la obtención de un bioplástico con propiedades favorables, mejorando sus características y potencial de aplicación.

A partir de la caracterización del bioplástico obtenido de cáscara de zapote, se validó su aplicabilidad en diversos sectores. Puede emplearse en la fabricación de dispositivos médicos desechables, bolsas portátiles, cubiertos y otros utensilios de corta vida útil. Además, es apto para la producción de envolturas para alimentos y recubrimientos protectores en empaques ecológicos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda explorar otros tipos de pretratamiento para optimizar la eficiencia en la extracción de celulosa, con el fin de mejorar el rendimiento del proceso y maximizar la obtención de materia prima para la producción de bioplásticos..

Se recomienda considerar la implementación de las semillas como materia prima adicional para la extracción de celulosa. Esto permitiría diversificar las fuentes de obtención de este biopolímero, maximizando el aprovechamiento integral de los residuos agroindustriales del zapote.

Se recomienda continuar el desarrollo del bioplástico a partir de cáscara de zapote, enfocándose en la optimización de sus propiedades mecánicas y químicas para ampliar su rango de aplicaciones. Además, sería valioso realizar pruebas de biodegradabilidad en diferentes entornos (compost, suelo y agua) para validar su impacto ambiental positivo.

## REFERENCIAS

- [1]Departamento Nacional De Planeación, "Estudio De Pérdida Y Desperdicio De Alimentos En Colombia 2023.[Online].Available: [https://Colaboracion.Dnp.Gov.Co/Cdt/Sinergia/Documentos/Estudio\\_Perdidas\\_Desperdicios\\_Alimentos\\_Ficha.Pdf](https://Colaboracion.Dnp.Gov.Co/Cdt/Sinergia/Documentos/Estudio_Perdidas_Desperdicios_Alimentos_Ficha.Pdf). [Accessed: 23-Enero -2024].
- [2]D. K. Jurado-Erazo, Y. A. Tulcán-Cuasapud, And A. F. Rojas González, "Perspectivas De Valorización De Residuos De Frutas A Partir De Sus Características Físicas," *Corpoica Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, Vol. 24, No. 1, 2023.
- [3]Informe De La Onu Sobre Contaminación Por Plásticos Advierte Sobre Falsas Soluciones Y Confirma La Necesidad De Una Acción Mundial Urgente. (S.F.). Un Environment.<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- [4]La Problemática De Los Rellenos Sanitarios - Aseca. (S.F.). Aseca. <https://aseca.com/la-problematica-de-los-rellenos-sanitarios/>
- [5]J. Alegria And H. J. Luis, "Evaluación Del Comportamiento De La Pulpa Del Fruto Del Zapote (Matisia Cordata) Frente A Procesos De Transformación Agroindustrial," Universidad De Cauca, 2005.
- [6]A.Mejia, "Tropical Fruta - Zapote. Matisia Cordata Foto Pro "Vecteezy", [<https://es.vecteezy.com/foto/24709960-tropical-fruta-zapote-matisia-cordata>].  
Accedido: Agosto,21, 2024.
- [7]Ortiz, G. A. S. (2006a). Evaluacion De La Calidad De La Fibra De Los Subproductos Del Fruta Del Zapote (Matisia Cordata) Y Su Aplicacion En La Elaboracion De Producto Fibroso [Universidad De Cauca].  
<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/7222/Evaluación%20de%20la%20calidad%20de%20la%20fibra%20de%20los%20subproductos%20de%20fruto%20del%20zapote.pdf?Sequence=1>
- [8]B. D. O. Rodríguez, "Determinación De La Resistencia A La Pudrición De La Madera De Matisia Cordata H-Umboldt& Bonprand "Sapote" Procedente De La Provincia De Padre

Abad- Ucayali, Al Ataque-De Dos Tipos-De-Hongos Xilófagos En Condiciones In Vitro," Universidad Nacional De Ucayali, 2014.

- [9]Identificación De Las Moscas De La Fruta Del Género Anastrepha Spp. Y Sus Enemigos Naturales En Cinco Frutales Nativos En Tingo María. (S/F). 1library.Co. Recuperado El 22 De Abril De 2024, De [Online]. Available: [Https://1library.Co/Document/Zp03n2vq-Identificacion-Moscas-Anastrepha-Enemigos-Naturales-Frutales-Nativos-Maria.Html](https://1library.Co/Document/Zp03n2vq-Identificacion-Moscas-Anastrepha-Enemigos-Naturales-Frutales-Nativos-Maria.Html)
- [10]M. A. S. Sussety And S. B. J. Neyll, "Extracción, Caracterización Y Determinación Del Tiempo De Vida Útil, Del Aceite De Semilla De Zapote (Matisia Cordata, Bonpl)," Universidad Señor De Sipan, 2016.
- [11]European Bioplastics, "Frequently Asked Questions On Bioplastics," European Bioplastics, 2023. [Online]. Available: [Https://Docs.European-Bioplastics.Org/Publications/Eubp\\_Faq\\_On\\_Bioplastics.Pdf](https://Docs.European-Bioplastics.Org/Publications/Eubp_Faq_On_Bioplastics.Pdf). [Accessed: 22-Mar-2024].
- [12]E. Cajo Y V. Manuel, "Desarrollo Y Caracterización De Un Bioplástico A Partir De Cáscara De Maracuyá (Passiflora Edulis)," Universidad Señor De Sipán, 2020.
- [13]C. Herrera, C. González-Moro, J. Zamora Y D. Gutiérrez, "Bioplástico Con Cáscara De Fruto Seco," Upm.Es. [En Línea]. Disponible En: [Https://Polired.Upm.Es/Index.Php/Ingenia\\_Materiales/Article/Viewfile/4435/4609](https://Polired.Upm.Es/Index.Php/Ingenia_Materiales/Article/Viewfile/4435/4609). [Accedido El 8 De Abril De 2024].
- [14] J. M. Madrid Rodríguez, Bioplásticos En La Industria Del Automóvil, Proyecto Fin De Carrera / Trabajo Fin De Grado, E.T.S.I. Industriales, Universidad Politécnica De Madrid (Upm), 2020.
- [15]B. A. Los Ángeles Rosales, "Obtención De Biopolímero Plástico A Partir Del Almidón De Malanga (Colocasia Esculenta), Por El Método De Polimerización Por Condensación En El Laboratorio 110 De La Unan-Managua, Mayo–Abril 2016," Doctoral Dissertation, Universidad Nacional, 2016.
- [16] "Petróleo: Reservas Mundiales 2005-2023 | Statista". Statista. Accedido El 23 De Noviembre De 2024. [En Línea]. Disponible: [Https://Es.Statista.Com/Estadisticas/634759/Reservas-Mundiales-De-Crudo/](https://Es.Statista.Com/Estadisticas/634759/Reservas-Mundiales-De-Crudo/)

- [17] F. Martínez Montes, J. Pardo Vázquez Y H. Riveros Rosas, "Bioquímica De Laguna Y Piña," El Manual Moderno, 15 De Julio De 2018.
- [18] L. E. M. Berrocal, "Desarrollo De Métodos De Fabricación De Bioplásticos A Partir De Algas Verdes," Pontificia Universidad Católica Del Perú, Noviembre De 2023.
- [19] M. Chávez-Sifontes And M. E. Domine, "Lignina, Estructura Y Aplicaciones: Métodos De Despolimerización Para La Obtención De Derivados Aromáticos De Interés Industrial," Avances En Ciencias E Ingeniería, Vol. 4, No. 4, Pp. 15-46, 2013.
- [20] "Química Orgánica Industrial," Escuela De Ingenierías Industriales - Uva. [En Línea]. Disponible En: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>. [Accedido El 18 De Abril De 2024].
- [21] G. P. Criollo Llumiugsi, "Extracción De Celulosa De Cáscara De Naranja, Estudio Del Método Y Aplicaciones", Trabajo De Grado, Esc. Super. Politec. Chimborazo Fac. Cienc., Riobamba-Ecuador, 2018.
- [22] M. I. Romero Pulido, "Hidrólisis Ácida Y Enzimática Del Residuo De Poda De Olivo. Fermentación De Hidrolizados Con Pachysolen Tannophilus", Tesis Doctoral, Univ. Jaen, Jaen, 2003.
- [23] A. M. Espinosa Negrín, L. M. López González, And N. L. Casdelo Gutiérrez, "Pretratamiento De Biomasa Lignocelulósica: Breve Revisión De Los Principales Métodos Utilizados," Centro Azúcar, Vol. 48, No. 3, Pp. 108-119, Jul. 2021. [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612021000300108&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000300108&lng=es&tlng=es). [Accessed: Aug. 22, 2024].
- [24] M. S. C. Pech Cohuo, "Obtención Y Modificación De Nanocristales De Celulosa De Residuos De Agave Tequilana Weber Para La Producción De Nanorefuerzos Para Poli (Acido Lactico)", Tesis Doctoral, Cent. Investig. Cient. Yucatan, A.C, Mexico, 2018.
- [25] B. V. Hernández López, "Extracción Del Cromo De Virutas De Cuero Provenientes De La Industria Del Curtido Mediante Hidrólisis Alcalina En Un Tambor De Curtido.", Tesis Especialista, Cons. Nac. Cienc. Tecnol., Guanajuato, 2021.

- [26]R. Delgado, "La Hidrólisis Alcalina," Monografias.Com. [En Línea]. Disponible En: <https://www.monografias.com/docs111/hidrolisis-alcalina/hidrolisis-alcalina>. [Accedido El 21 De Abril De 2024].
- [27]A. M. Vele Salto, M. F. Abril González, T. S. Zalamea Piedra, Y V. P. Pinos Vélez, "Mini Revisión: Aplicación De Líquidos Iónicos En Hidrólisis Ácida De Material Lignocelulósico Para La Obtención De Azúcares," *\*Ciencia En Desarrollo\**, Vol. 12, No. 1, Pp. 55-67, 2021. Doi: 10.19053/01217488.V12.N1.2021.12477.
- [28]B. A. Los Ángeles Rosales, "Obtención De Biopolímero Plástico A Partir Del Almidón De Malanga (Colocasia Esculenta), Por El Método De Polimerización Por Condensación En El Laboratorio 110 De La Unan-Managua, Mayo–Abril 2016," Doctoral Dissertation, Universidad Nacional, 2016.
- [29]M. P. Pacheco, "Proceso De Obtención De Bioplásticos Reforzados Con Grafeno Y Su Evaluación Para El Uso En Bolsas Ecológicas," Doctoral Dissertation, Universidad Nacional Mayor De San Marcos, 2024.
- [30]American Society For Testing And Materials (Astm). 1989. Standard Test Methods For Water Vapor Transmission Of Materials (E96-80) In: Annual Book Of Astm Standards. Philadelphia. 730–739 P.
- [31] L. Oliveira, R. Alves, M. Sarantopoulis, M. Padula, E. García, And L. Coltro, *\*Ensaio Para Avaliação De Embalagens Plásticas E Flexíveis\**. Centro De Tecnología De Embalagem-Campinas, 1996, 216 P.
- [32]J. M. Muñoz, "Evaluación, Caracterización Y Optimización De Un Bioplástico A Partir De La Combinación De Almidón De Maíz, Yuca Y Glicerol En Sus Propiedades Físicas Y De Barrera," Doctoral Dissertation, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2014.
- [33]A. E. Paspuel, "Caracterización De Un Bioplástico De Almidones De Maíz Y Yuca Con Antocianinas De Repollo Morado (Brassica Oleracea) Como Potencial Indicador De Ph," Doctoral Dissertation, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2016.

- [34]N. Vicentini, "Elaboração E Caracterização De Filmes Comestíveis A Base De Fécula De Mandioca Para Uso Em Pós-Colheita," Tesis De Doctorado, Faculdade De Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, Sp, 2003.
- [35]N. Gontard, S. Guilbert, Y J. Cuq, "Edible Wheat Gluten Films: Influence Of The Main Processes Variables On Films Properties Using Response Surface Methodology," \*Journal Of Food Science\*, Vol. 57, No. 1, Pp. 190-195, 1992.
- [36]Cho, Seung & Rhee, Chul. (2004). Mechanical Properties And Water Vapor Permeability Of Edible Films Made From Fractionated Soy Proteins With Ultrafiltration. *Lwt - Food Science And Technology*. 37. 833-839. 10.1016/J.Lwt.2004.03.009.
- [37]J. R. Motos, E. Núñez-Delicado, B. Cerdá, R. A. Salinas, B. Ferrández-Gómez, Y A. Cerdá, "Alimentos De La Región De Murcia: Limón," 2020.
- [38] G. Rocha, "Obtenção E Caracterização De Filmes Biodegradáveis A Partir De Misturas De Amido De Mandioca E Extrato Protéico De Soja," Tese De Mestrado Em Ciências, Programa De Pós-Graduação Em Ciência E Tecnologia De Alimentos, Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro, Seropédica, Rj, Brasil, 2009, Pp. 2-57.
- [39]Ferreira, A. 1986. Novo Dicionário De Língua Portuguesa, 2a Ed., 35a Impressão, Editora Nova Fronteira.
- [40]Shih, F. 1996. Edible Films From Rice Protein Concentrate And Pullulan. *Cereal Chemistry*, V.73, N.3, 406-409 P
- [41]Shiku, Y., P. Hamaguchi, S. Benjakul, W. Visessanguan And M. Tanaka. 2004. Effect Of Surimi Quality On Properties Of Edible Films Based On Alaska Pollack. *Food Chemistry*, V. 86, N. 4. 493–499 P.
- [42]S. Cho Y C. Rhee, "Mechanical Properties And Water Vapor Permeability Of Edible Films Made From Fractionated Soy Proteins With Ultrafiltration," *Lebensmittel-Wissenschaft Und -Technologie*, Vol. 37, No. 8, Pp. 833-839, 2004.
- [43]M. M. Charro Espinosa, «Obtención De Plástico Biodegradable A Partir De Almidón De Patata,» 2015. [En Línea]. Available:

[Http://Www.Dspace.Uce.Edu.Ec/Bitstream/25000/3788/1/T-Uce-0017-97.Pdf](http://Www.Dspace.Uce.Edu.Ec/Bitstream/25000/3788/1/T-Uce-0017-97.Pdf). [Último Acceso: 23 Septiembre 2024].

- [44] Travaini, R., "Pretratamiento Del Bagazo De Caña De Azúcar Por Ozonólisis Para Obtención De Bioalcoholes: Efectos Sobre La Liberación De Azúcares, La Generación De Inhibidores Y Las Fermentaciones," 2016.
- [45] Á. C. Forero Espinel, "Revisión De Los Pretratamientos Ácido Diluido, Alcalino Y Afex Aplicados A Diferentes Tipos De Biomosas", Trabajo Magister, Univ. Nac. Colombia., Bogota D.C, 2018.
- [46] M. Bayona Albalate, "Pretratamientos Físico-Químicos De Residuos Agrícolas Para La Obtención De Biocombustibles.", Trabajo De Grado, Univ. Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [47] A. P. D. , A. Guarnizo Franco, Martínez Yepes , Valencia Sanchez, "Pretratamientos De La Celulosa Y Biomasa Para La Ciencia Et Technica Año Xv, No 42, Ciencia Et Technica Año Xv, No 42, Sacarificación", Sci. Tech. Ano Xv, N.º 42, Pp. 284–289, 2009.
- [48] H. J. Hernández Durán, "Reutilización De Colillas De Cigarrillos Para Elaboración De Materiales Prefabricados Para La Construcción De Obras Civiles," Revista De Investigación, Vol. 1, No. 14, Pp. 65–73, 2023. Doi: <https://doi.org/10.5377/Revunivo.V1i14.16871>.
- [49] V. Vatanpour Et Al., "Cellulose Acetate In Fabrication Of Polymeric Membranes: A Review," Chemosphere, Vol. 295, No. 133914, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133914>.
- [50] K. S. C. Gonzalez, "Obtención De Acetato De Celulosa A Partir De Papel Reciclado: Una Alternativa Para La Producción De Acetato De Celulosa En Colombia," Org.Br. [Online]. Available: [https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020\\_190956\\_5f7113cc9b181.pdf](https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020_190956_5f7113cc9b181.pdf). [Accessed: Sep. 3, 2024].
- [51] L. T. De La Cruz Rodríguez, "Eficiencia De La Celulosa Obtenida A Partir De Raquis De Musa Paradisiaca Para Remoción De Cadmio En Aguas Superficiales.", Trabajo De Grado, Univ. Cesar Vallejo, Chiclayo – Perú, 2019.

- [52]J. B. A. Pinos Y C. A. M. Cajamarca, "Obtención De Acetato De Celulosa A Partir De Colillas De Cigarrillo, "Reviberpol.Org\*. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-23-2-63-81.pdf> (Recuperado El 3 De Septiembre De 2024).
- [53]S. Morales De La Rosa, Hidrólisis Ácida De Celulosa Y Biomasa Lignocelulósica Asistida Con Líquidos Iónicos, Csic, 2015. Disponible En: [https://digital.csic.es/bitstream/10261/132717/1/Morales\\_De\\_La\\_Rosa\\_Silvia.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/132717/1/Morales_De_La_Rosa_Silvia.pdf). [Accedido: 24-Mar-2024].
- [54]J. B. A. Pinos And C. A. M. Cajamarca, "Obtención De Acetato De Celulosa A Partir De Colillas De Cigarrillo," Revista Iberoamericana De Polímeros, Vol. 23, No. 2, Pp. 63-81, Mar. 2022.
- [55]Y. P. G. Villa , "Extracción De La Celulosa A Partir De Los Residuos De Común (Festuca Arundinacea) Para La Elaboración De Acetato De Celulosa," Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [56]H. Q. De R. A. P. O. De A.113 R. R. B., "Trabajo Fin De Grado," Unizar.Es. <https://zagan.unizar.es/record/110068/files/taz-tfg-2021-4916.pdf> (Recuperado El 3 De Septiembre De 2024).
- [57]J. Paquot And M. Ph. Thonart, "Alternativas Para Utilizar De Sustratos Ligno-Celulosicos: Hidrolisis Acida O Enzimatica De La Celulosa," Interferon Y Biotecnologia, Pp. 87–102, 1985.
- [58]M. C. Area Y M. E. Vallejos, "Bio-Productos Y Bio-Materiales A Partir De La Biorrefinería De Residuos Agro Y Forestoindustriales," \*Com.Br\*. [https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2016\\_panorama\\_cap07\\_bioproductos+biomateriales.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2016_panorama_cap07_bioproductos+biomateriales.pdf) (Recuperado El 3 De Septiembre De 2024).
- [59]R. J. Moon, A. Martini, J. Nairn, J. Simonsen, And J. Youngblood, "Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties And Nanocomposites," Chemical Society Reviews, Vol. 40, Pp. 3941-3994, 2011, Doi: 10.1039/C0cs00108b.
- [60]R. Hernández Pérez, A. Álvarez Castillo, A. Olarte Paredes, Y A. M. Salgado Delgado, "Obtención De Nanocelulosa A Partir De Residuos Postcosecha," Mundo Nano. Revista

Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología, Vol. 16, No. 30, E00065, 2023. [En Línea]. Disponible En: <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2023.30.69662>

[61] Y. González García, J. C. Meza Contreras, O. González Reynoso, Y J. A. Córdova López, "Síntesis Y Biodegradación De Polihidroxicanoatos: Plásticos De Origen Microbiano," Rev. Int. Contam. Ambient., Vol. 29, No. 1, Pp. 77-115, 2013. [En Línea]. Disponible En: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992013000100007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000100007). [Accedido: 08-Sep-2024].

[62] L. Serna C., A. Rodríguez De S., Y F. Albán A., «Ácido Poliláctico (Pla): Propiedades Y Aplicaciones», Inycomp, Vol. 5, N.º 1, Pp. 16–26, Ene. 2003.

[63] "Vista De Ácido Poliláctico (Pla): Propiedades Y Aplicaciones," Revista Ingeniería, S.F. [Online]. Available: [https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/2301/3051](https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301/3051). [Accessed: Sep. 6, 2024].

[64] J. M. P. Coutin Y M. J. C. Arroyo, "Modificación De La Mojabilidad De Algodón Reciclado A Partir De Un Recubrimiento Bioplástico," Universidad Pontificia Bolivariana, 2023. [En Línea]. Disponible: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11332/Modificaci%20de%20la%20mojabilidad%20de%20algod%20reciclado.pdf?sequence=1&isallowed=Y>. [Accedido: 07-Sep-2024].

[65] G.S. Ortega , "Vista De Síntesis De Acetato De Celulosa Y Rayón A Partir De Residuos Agroindustriales Del Cultivo Y Procesamiento De Piña | Revista Teinnova." [Online]. Available: <https://revistas.sena.edu.co/index.php/cditi/article/view/2355/2636>

[66] Escobar, D., Sala, A., Silvera, C., Harispe, R., Y Márquez, R., "Películas Biodegradables Y Comestibles Desarrolladas En Base A Aislado De Proteínas De Suero Lácteo: Estudio De Dos Métodos De Elaboración Y Del Uso De Sorbato De Potasio Como Conservador," Innotec, Vol. 0, No. 4, Pp. 33-36, 2019. [Online]. Disponible En: Issn 1688-3691.

[67] I. Ruiloba, M. Li, R. Quintero, Y J. Correa, "Elaboración De Bioplástico A Partir De Almidón De Semillas De Mango," Vol. 4, Panamá, 2018.

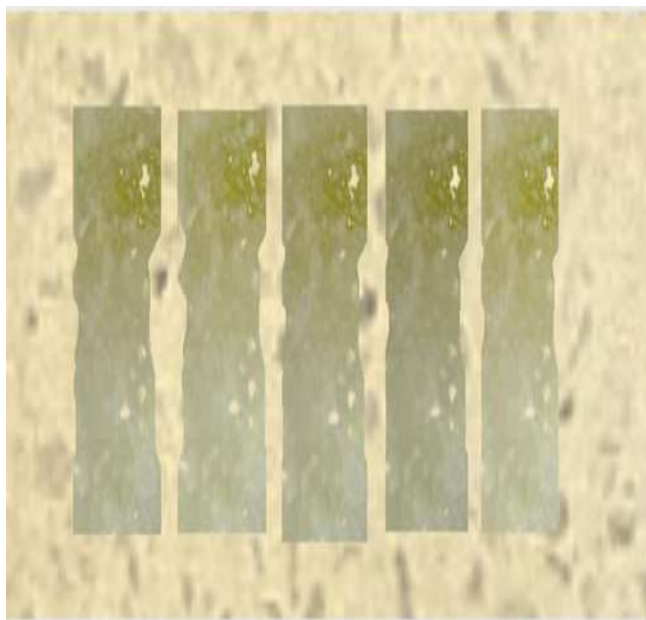
- [68]L. Sun, J. Sun, L. Chen, P. Niu, X. Yang, And Y. Guo, "Preparation And Characterization Of Chitosan Film Incorporated With Thinned Young Apple Polyphenols As An Active Packaging Material," *Carbohydrate Polymers*, Vol. 8617, No. 17, 2017. Doi: 10.1016/J.Carbpol.2017.01.016.
- [69]J. Guamán, "Obtención De Almidón De Cáscaras De Papa Para Su Aplicación Industrial," *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo*, 2019. [Online]. Available: <Http://Dspace.Espoch.Edu.Ec/Handle/123456789/11069>.
- [70]M. C. Morocho-Pilataxi, L. M. Flores-Fiallos, V. M. Dalgo-Flores, And G. C. Chango-Lescano, "Caracterización Físico-Química Y Mecánica De Bioplásticos Obtenidos A Partir Del Trigo Y Cebada," *Dyna*, Vol. 7, No. 4, Pp. 1-8, Aug. 2021. Doi: [10.23857/Dc.V7i4.2114](<Http://Dx.Doi.Org/10.23857/Dc.V7i4.2114>).
- [71] M. Charro, *Obtención De Plástico Biodegradable A Partir De Almidón*, Universidad Central Del Ecuador, Quito, 2015.
- [72] S. K. Patel, M. V. Goud, And P. M. K. Kumar, "Moisture Absorption And Swelling Behavior Of Cellulose-Based Bioplastics," *Journal Of Polymer Science And Technology*, Vol. 5, No. 2, Pp. 48-58, 2019. Doi: 10.1016/J.Jpol.2019.02.012.
- [73] Astm International, *Astm D638 - Standard Test Method For Tensile Properties Of Plastics*, West Conshohocken, Pa, Usa, 2014. Disponible: [<Https://Www.Astm.Org>](<Https://Www.Astm.Org>).
- [74] "Acetato De Celulosa", *Tecnología De Los Plásticos*, 11 De Julio De 2011. [En Línea]. Disponible En: <Https://Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2011/07/Acetato-De-Celulosa.Html>. [Accedido: 31-Ene-2025].

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**CALCULOS**

**Figura 38**

*Probetas*



**Nota.** En la figura 38 se muestra las 5 probetas obtenida del acetato de celulosa de cascara de zapote.

## ANEXO 2.

### PRUEBA DE SOLUBILIDAD

$$\% \text{ solubilidad} = 1 \frac{PI - PF}{PI} * 100$$

$$\% \text{ solubilidad} = 1 \frac{0.135 - 0.066}{0.135} * 100$$

$$\% \text{ solubilidad} = 51.11\%$$

### ANEXO 3.

#### PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Según la ecuación 4 e calculo la permeabilidad de vapor de agua como se muestra a continuación en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Datos para la prueba de permeabilidad de vapor*

<b>PERDIDA DE MASA g</b>	<b>ÁREA m</b>	<b>TIEMPO h</b>	<b>ESPESOR m</b>	<b><math>\Delta P</math> Mpa</b>
$4 * 10^{-5}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	1	$174 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa
$3 * 10^{-5}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	2	$165 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa
$3 * 10^{-5}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	3	$155 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa
$4 * 10^{-4}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	4	$2 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa
$1 * 10^{-5}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	5	$164 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa
$1 * 10^{-5}$ g	$7 * 10^{-4}$ m	6	$160 * 10^{-4}$ m	$3169 * 10^{-3}$ Mpa

**Nota.** En la tabla 13 se plasmaron los datos para implementar la ecuación de permeabilidad

## ANEXO 4.

### PRUEBA DE MODULO DE ELASTICIDAD

**Tabla 14**

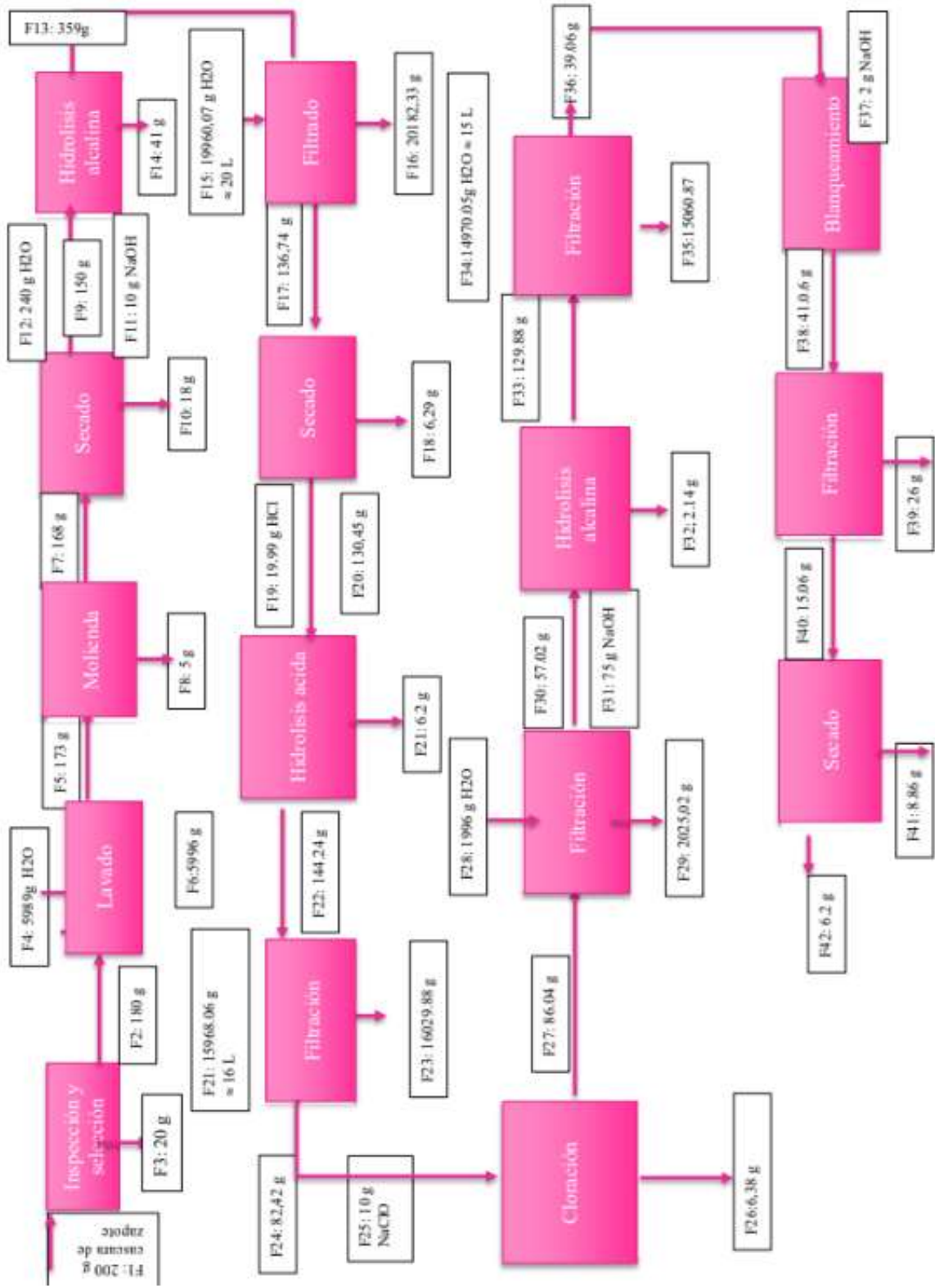
*Datos para calcula la prueba de módulo de elasticidad*

Área	Fuerza	Elongación	Módulo de elasticidad
900 mm <sup>2</sup>	10 N	0,00042	23.67 N/mm <sup>2</sup>
900 mm <sup>2</sup>	10 N	0,0004708	21.24 N/mm <sup>2</sup>
900 mm <sup>2</sup>	10 N	0,0004159	24.04 N/mm <sup>2</sup>

*Nota.* En la tabla 14 se plasmaron los datos para implementar la ecuación del módulo de elasticidad

## ANEXO 5

### BALANCE DE MATERIA EXTRACCION DE CELULOSA



**Tabla 15***Balance de masa de la acetilacion*

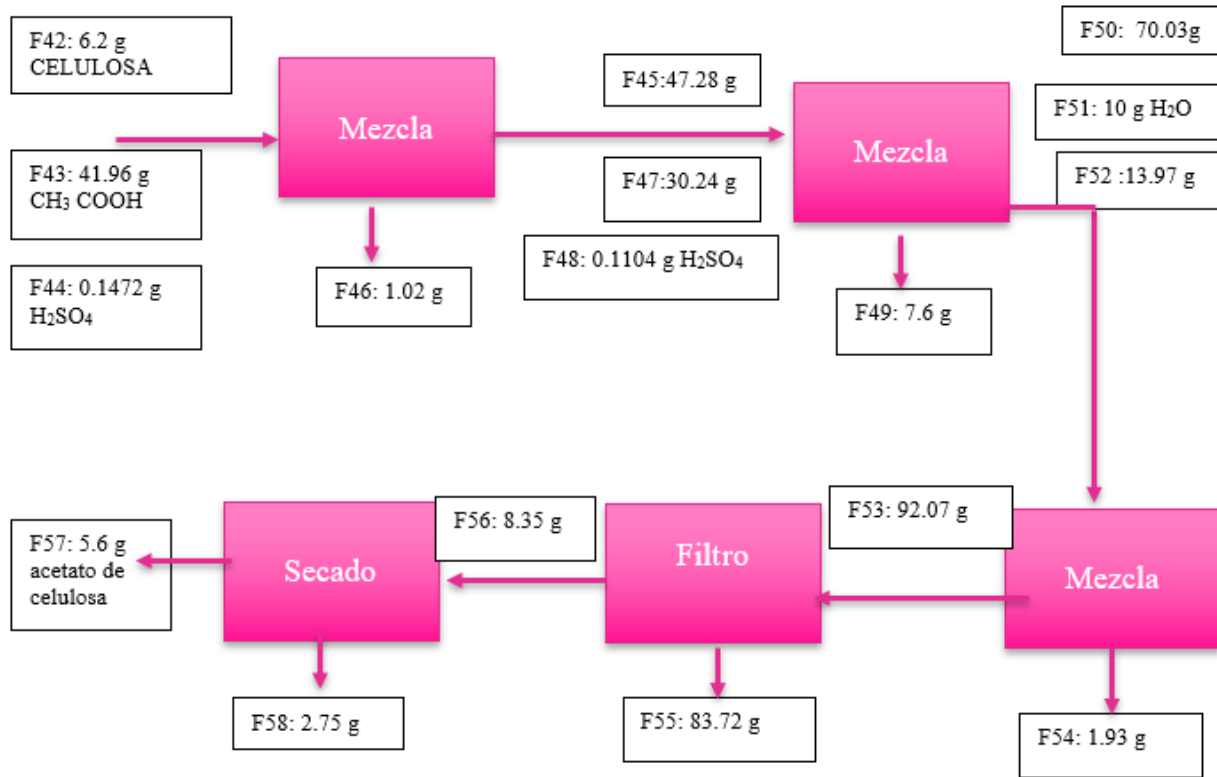
Corriente	Masa g	Especificación	Corriente	Masa g	Especificación
F1	200	Cascara de zapote	F22	144.24	Pulpa con hidrolisis acida
F2	180	Cascara de zapote en buen estado	F23	16029.88	Agua destilada con impurezas
F3	20	Impurezas	F24	82.42	Pulpa filtrada y neutralizada
F4	5989	Agua	F25	10	200 ml NaCl con una concentración 5%
F5	173	Cascara de zapote lavada	F26	6.38	Evaporación de NaCl
F6	5996	perdidas	F27	86.04	Pulpa después de la cloración
F7	168	Cascara de zapote molida	F28	1996	Agua destilada para neutralizar
F8	5	Desperdicio de cascara de zapote	F29	2025.02	Agua destilada con impurezas
F9	150	Cascara de zapote secada	F30	57.02	Pulpa filtrada después de neutralizada
F10	18	Agua evaporada	F31	75	300 ml de NaOH al 25%
F11	10	NaOH	F32	2.14	NaOH evaporada
F12	240	Agua	F33	129.88	Pulpa con eliminación de lignina, hemicelulosa e impurezas fa
F13	359	Cascara de zapote con reducción de lignina y hemicelulosa e impurezas	F34	14970.05	Agua destilada para neutralizar
F14	41	Impurezas, agua evaporada	F35	15060.87	Agua con impurezas y residuos de NaOH
F15	19960,07	Agua destilada para la filtración	F36	39.06	Pulpa neutralizada
F16	20182.33	Impurezas después de la neutralización	F37	2	200 ml de NaCl al 1%
F17	136.74	Cascara de zapote neutralizada	F38	26	Impurezas de la filtración
F18	6.28	Agua evaporada	F39	41.06	Pulpa blanqueada

F19	19.99	500 ml de HCl en concentración 1 M	F40	15.06	Pulpa filtrada
F20	130.45	Pulpa seca	F41	8.86	Agua evaporada
F21	6.2	Acido evaporado y agua	F42	6.2	Celulosa extraída

*Nota.* En tabla 15 se plasmaron los datos del balance de masa para el proceso de acetilación de la celulosa. Tomando la densidad del agua a los 25 °C con un valor de 0.9982 g/ml

## ANEXO 6.

### BALANCE DE MASA DE MODIFICACION DE CELULOSA



**Tabla 16**

*Balace da masa del bioplástico*

Corriente	Masa g	Especificaciones	Corriente	Masa g	Especificaciones
F43	41.96	40 ml de Acido glacial 98%	F51	10	Agua
F44	0.1472	0.08 ml de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	F52	13.97	Acido acetico 20 ml
F45	47.28	Mezcla homogénea	F53	92.07	Mezcla homogénea
F46	1.02	impurezas	F54	1.93	impurezas
F47	30.24	Anhibrido acetico 28 ml	F55	83.72	impurezas
F48	0.1104	0.6 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	F56	8.35	Material filtrado
F49	7.6	impurezss	F57	2.75	Agua retirada
F50	70.03	Mezcla	F58	5.6	Acetato de celulosa

**Nota.** En la tabla 16 se plasmaron los datos del balance de masa para el proceso de bioplástico a partir de cascara de zapote