

UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERÍA QUÍMICA

OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE SAGÚ (CANNA ENDULIS
KER) CON REFUERZO DEL RESIDUO DE OREJERO (ENTEROLOBIUM
CYCLOCARPUM).

AUTORES

JENNIFER PRIETO GALEANO

JUAN ANDRÉS ROMERO PEDRAZA

NICOLLE ELIANA VILLAMIL AGUIRRE

DIRECTORES

JOHANNA KARINA SOLANO MEZA

JOHN JAIRO PORRAS VEGA

BOGOTÁ D.C., 2024

CONTENIDO

Resumen	5
Abstract	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general.	7
2.2 Objetivos específicos.	7
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	8
4.1 Problema de investigación.	8
5. JUSTIFICACIÓN	9
6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	11
7. MARCO TEÓRICO	13
7.1 Bioplásticos	13
7.1.1 Tipos de bioplásticos	14
7.1.2 Elaboración de bioplásticos procedentes de biomasa	15
1.1.1 Elaboración de bioplásticos procedentes de proteínas	19
7.1.3 Bioplástico y plástico convencional.	19
7.2 Normativa	21
7.3 Sagú (CANNA ENDULIS KER)	24
7.3.1 Almidón de Sagú (CANNA ENDULIS KER)	25
7.3.2 Características del almidón	26
7.4 Orejero (ENTEROLOBIUM CYCLOCARPUM)	27
7.4.1 Composición del fruto	28
7.4.2 Usos	30
7.5 La Economía circular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales.	30
7.5.1 Economía circular	30
7.5.2 Residuos Agroindustriales	31
8. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN MIXTO	32
8.1 Enfoque de la investigación: Experimental y descriptivo	32
9. VARIABLES CUANTITATIVAS.	33
10. VARIABLES CUALITATIVAS.	34
11. SELECCIÓN Y DESARROLLO DE SOLUCIÓN.	34

11.1	Selección de la Solución	34
11.2	Desarrollo de Solución	36
12.	RESULTADOS.	38
12.1	Formación de biopelícula	38
12.1.1	Cronograma de desarrollo	39
12.1.2	Materiales e instrumentos utilizados para la fabricación de las biopelículas	42
12.2	Resultados búsqueda síntesis ideal para la formación de biopelículas	43
12.3	Pruebas de caracterización de la biopelícula.	48
13.	ANÁLISIS DE COSTOS.	53
14.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.	54
15.	CONCLUSIONES.	57
16.	RECOMENDACIONES	58
17.	REFERENCIAS.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición Química (%) del almidón.	27
Tabla 2.	Características fisicoquímicas del almidón.	27
Tabla 3.	Composición química de orejero.	29
Tabla 4.	Composición química de la semilla de orejero.	29
Tabla 5.	Cronograma de actividades.	40
Tabla 6.	Lista de instrumentos.	42
Tabla 7.	Lista de materiales.	43
Tabla 8.	Prueba 1.	45
Tabla 9.	Prueba 2.	46
Tabla 10.	Prueba 3.	46
Tabla 11.	Prueba 4.	46
Tabla 12.	Prueba 5.	47
Tabla 13.	Prueba 6, Blanco/Sagú.	47
Tabla 14.	Prueba 7.	47
Tabla 15.	Prueba 8, replica prueba 7.	47
Tabla 16.	Pruebas de Biodegradabilidad - Fase inicial.	50

Tabla 17. Pruebas de Biodegradabilidad - Fase final.	51
Tabla 18. Densidad.	52
Tabla 19. Costo de materias primas.	53
Tabla 20. Costo de mano de obra.	53
Tabla 21. Costo de horas de laboratorio.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Bioplásticos.	15
Figura 2. Orejero.	28
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso.	39
Figura 4. Disolución PvOH	44
Figura 5. Trituración y tamizado del cascarón del fruto de árbol de orejero.	44
Figura 7. Comparación pruebas 6,7 y 8.	48
Figura 8. Ensayo 1 con prueba 7.	48
Figura 9. Ensayo 2 con prueba 8.	49
Figura 10. Ensayo 3 con prueba 6, blanco.	49
Figura 11. Prueba # 7 antes de someterlas a prueba.	51
Figura 12. Trozo de prueba 7.	52
Figura 13. Muestra en salmuera	52
Figura 14. Muestra en agua	52
Figura 15. Muestra en tierra	52

Resumen

La necesidad de mitigar cada vez más la problemática medioambiental y de salud pública derivada de la utilización en grandes proporciones de los plásticos de un solo uso por el ser humano en su consumo diario, ha incitado a la investigación y elaboración de nuevos productos que alivien las necesidades de consumo y a su vez sean amigables con el medio ambiente. Los bioplásticos son una de las alternativas que surgieron progresivamente, se elaboran con fuentes como el almidón de yuca, papa, maíz, entre otros, y residuos agrícolas. En este proyecto de grado se elaboró una investigación para la síntesis y caracterización de un bioplástico a base de almidón de sagú (*Canna endulis ker*) combinado con residuo de orejero (*Enterolobium cyclocarpum*) material innovador en este tipo de procesos. El objetivo de este trabajo es demostrar porque son idóneos para elaborar bioplásticos y que satisfacen las necesidades de un mercado en auge.

Palabras clave: Orejero, Sagú, bioplásticos, biodegradabilidad, Alternativa.

Abstract

The need to increasingly mitigate the environmental and public health problems derived from the use in large proportions of single-use plastics by human beings in their daily consumption, has prompted the research and development of new products that alleviate consumption needs and at the same time are environmentally friendly. Bioplastics are one of the alternatives that emerged progressively, they are made with sources such as cassava starch, potato, corn, among others, and agricultural waste. In this degree project, an investigation was carried out for the synthesis and characterization of a bioplastic based on sagu starch (*Canna endulis ker*) combined with Orejero residue (*Enterolobium cyclocarpum*), an innovative material in this type of process. The objective

of this work is to demonstrate why they are suitable to produce bioplastics and that they satisfy the needs of a growing market.

Key words: Orejero, Sagú3, bioplastics, biodegradability, Alternative.

1. INTRODUCCIÓN

Los plásticos convencionales, elaborados en su mayoría a partir de derivados del petróleo, tienen una vida útil corta, pero suponen un problema ambiental derivado por su degradación. La producción mundial de plástico en 2022 alcanzó los 353 millones de toneladas, de las cuales el 56% llegó a vertederos, el 25% fue incinerado y tan solo el 19% de este fue reciclado (OECD, 2023; Plastics Europe, 2023).

Su degradación puede tardar de 100 a 1000 años aproximadamente (Rojas et al., 2020), tiempo en el que permanecen en diversos ecosistemas, contaminando vías fluviales, afectando la vida silvestre y alterando la cadena alimenticia. Su degradación libera sustancias químicas tóxicas que pueden contaminar el agua y los alimentos, lo que plantea riesgos para la salud humana gracias a la amplia dispersión y persistencia de los micro plásticos en el medio ambiente (Thompson et al., 2009).

La necesidad de abordar este problema ha aumentado en la investigación y desarrollo de alternativas sostenibles, como los bioplásticos de un solo uso, que pueden reducir la dependencia de los plásticos convencionales y mitigar sus impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Al sustituir a los plásticos convencionales por bioplásticos, se promueve la adopción de un enfoque de economía circular. Este enfoque implica el cierre del ciclo de producción mediante procesos como el compostaje o el reciclaje, lo que conlleva a la reducción significativa de la

generación de residuos y fomenta la innovación en la gestión de recursos y el diseño de alternativas.

En la primera parte de este documento se presenta el marco conceptual de los bioplásticos y el problema ambiental de los plásticos convencionales elaborados con derivados del petróleo, y luego se mencionan los procedimientos de elaboración de bioplásticos con material orgánico. Luego se abordan los trabajos experimentales desarrollados para la síntesis del bioplástico junto al análisis de resultados y las conclusiones.

En el proyecto de investigación se utilizó y aprovechó el residuo agroindustrial del orejero (*Enterolobium cyclocarpum*), para combinarlo con el almidón de sagú, y sintetizar un bioplástico con propiedades mecánicas y físicas que se asemejaran a las de los plásticos convencionales, generando un material biodegradable e innovadora, ya que este residuo no se usa para ello.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

Obtener un bioplástico a partir del almidón de Sagú, combinado con el residuo agroindustrial del orejero (*Enterolobium cyclocarpum*).

2.2 Objetivos específicos.

- Sintetizar una mezcla con base de almidón de sagú y residuo de Orejero que permita obtener un bioplástico
- Caracterizar el bioplástico obtenido a partir de pruebas de biodegradabilidad, tensión, y elongación.

- Comparar los resultados obtenidos de una biopelícula sintetizada con otros bioplásticos a partir de almidones naturales.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

4.1 Problema de investigación.

Los plásticos surgieron como alternativas versátiles y duraderas a los materiales naturales (Dunn, 2018). Su rápida evolución ha revolucionado industrias como la automotriz, la construcción y el envasado (Andrady & Neal, 2009), pero también ha generado graves problemas ambientales. Según Geyer, Jambeck y Law (2017), desde la década de 1950 se han producido aproximadamente 8.300 millones de toneladas métricas de desechos plásticos en todo el mundo. Según Plastics Europe los 353 millones de toneladas de desechos plásticos generados tan solo en 2023 se acumularon en un 56% en vertederos y tan solo el 19% de estos fue reciclado.

Frente a este panorama, la producción de bioplásticos emerge como una solución destacada para disminuir los impactos ambientales negativos ligados a los plásticos convencionales en especial los de un solo uso. Akiyama et al. (2020) señalan que estos materiales, derivados de fuentes renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar, ofrecen una alternativa sostenible al plástico derivado de hidrocarburos.

La contaminación plástica es un problema relevante en países como Colombia que generan alrededor de 12 millones de toneladas métricas de residuos sólidos al año, muchos de los cuales son plásticos, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Además, los residuos agroindustriales, derivados del procesamiento de biomasa, plantean desafíos ambientales y económicos. Se estima que en Colombia se producen más de 71 millones de toneladas de residuos

sólidos agroindustriales al año, de las cuales solo el 17% se aprovecha en algún uso secundario, mientras que el resto se dispone en vertederos incontrolados o se incinera (Corpoica, 2019).

Ante esta situación, la producción de bioplásticos hecho a partir de alternativas innovadoras y sostenibles que busquen un margen de aprovechamiento de materias orgánicas desechadas, se plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible sintetizar una biopelícula compuesta por almidón de Sagú y Orejero (*Enterolobium cyclocarpum*), como alternativa de aprovechamiento de residuos agroindustriales, así como para la sustitución de plásticos de un solo uso para la minimización de impactos ambientales?

5. JUSTIFICACIÓN

Los plásticos, surgieron como una respuesta a la creciente demanda de alternativas más versátiles y duraderas a los materiales naturales (Dunn, 2018). Desde entonces, los plásticos han experimentado una rápida evolución, con la introducción de una amplia gama de polímeros sintéticos, que han revolucionado industrias como la automotriz, la construcción y el envasado (Andrady & Neal, 2009). Sin embargo, este éxito también ha llevado a problemas ambientales significativos. Según Geyer, Jambeck y Law (2017), desde la producción en masa de plásticos en la década de 1950, se han generado aproximadamente 8.300 millones de toneladas métricas de desechos plásticos en todo el mundo, de los cuales solo se ha reciclado alrededor del 9%. Estos desechos plásticos, muchos de un solo uso, se acumulan en vertederos y océanos, contribuyendo a la contaminación del aire, el suelo y el agua generando un complejo problema de contaminación.

En Colombia, el problema de la contaminación plástica también es significativo. Según datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el país genera aproximadamente 12 millones de toneladas métricas de residuos sólidos al año, de los cuales una

parte importante son plásticos. Aproximadamente el 85% de estos desechos plásticos terminan en vertederos o contaminan el medio ambiente, representando una amenaza para la biodiversidad y la salud pública (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2020).

Ante esta situación, la producción de bioplásticos se destaca por su potencial para mitigar los impactos ambientales negativos asociados con los plásticos convencionales. Según Akiyama et al. (2020), los bioplásticos, al estar fabricados a partir de fuentes renovables como almidón de maíz, caña de azúcar o incluso residuos agrícolas, ofrecen una alternativa sostenible a los plásticos derivados del petróleo. Además, estos materiales biodegradables pueden reducir significativamente la acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente (Briassoulis, 2021), disminuyendo así la contaminación del suelo y los océanos. Su versatilidad en aplicaciones industriales y de consumo, combinada con su capacidad para descomponerse naturalmente al final de su ciclo de vida, hace que la producción de bioplásticos sea una opción prometedora contra la contaminación y el cambio climático.

La síntesis de bioplásticos ofrece alternativas innovadoras y sostenibles a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Al ser fabricados a partir de fuentes renovables, como plantas o residuos orgánicos, los bioplásticos reducen la huella de carbono asociada con la extracción y procesamiento de petróleo, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático (Papong et al., 2021). Además, la capacidad de biodegradación de los bioplásticos significa que pueden descomponerse naturalmente al final de su ciclo de vida, reduciendo la contaminación plástica y protegiendo la biodiversidad en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Kumar et al., 2021).

Aprovechar los residuos agroindustriales para generar nuevas e innovadoras formas de hacer bioplásticos es beneficioso por diversas razones. En primer lugar, esta práctica contribuye a

reducir la cantidad de residuos orgánicos que terminan en vertederos o se descargan en el medio ambiente, ya que actualmente los residuos sólidos agroindustriales se generan en gran cantidad. En Colombia, se estima que se generan más de 71 millones de toneladas de residuos sólidos agroindustriales (RSAI) al año. De esta cantidad, solo el 17% se aprovecha en algún uso secundario, mientras que el resto se dispone en vertederos incontrolados o se incinera (Corpoica, 2019).

Dentro de este margen de aprovechamiento identificado, se destaca el *Enterolobium cyclocarpum*, conocido también como Orejero o Piñón de Oreja, sus usos más frecuentes son, el suministro suplementario en la alimentación del ganado en la región caribeña de Colombia y elaboración de dulces y artesanías (Calle et al.,2020) Por otro lado, el *Canna endulsi* (Sagú) se emplea mayoritariamente en la industria alimentaria, tanto en su vertiente industrial como artesanal. Sin embargo, se observa una falta de valorización más allá de las aplicaciones relacionadas con el consumo directo. La investigación busca ampliar el marco de aplicaciones del Orejero, junto con almidón de sagú, para proporcionar una opción innovadora y funcional de bioplástico para varios usos.

6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Se necesita asegurar la disponibilidad y calidad de las materias primas, especialmente del residuo agroindustrial del orejero y del almidón de sagú. Es crucial identificar nuestros principales proveedores para garantizar un suministro confiable y de alta calidad.

Es indispensable contar con un laboratorio equipado para poder realizar análisis al bioplástico. Este laboratorio debe realizar pruebas de biodegradabilidad, análisis térmico que nos ayuden a evidenciar el comportamiento a diferentes temperaturas y ver su punto de fusión, y

análisis mecánico para evaluar propiedades como la compresión, flexibilidad y tracción. Por otro lado, se analizará la capacidad de que el material sea compostable en condiciones controladas. La disponibilidad de los equipos necesarios es fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados; así como el acondicionamiento adecuado de las muestras para los estudios antes mencionados.

Se llevarán a cabo diversos ensayos en el laboratorio con el fin de sintetizar dicho bioplástico con una base teórica de componentes, los cuales se irán cambiando, combinando y alternando sus concentraciones másicas. Para encontrar la mezcla idónea que satisfaga mejor los parámetros de calidad presentados por las normativas nacionales e internacionales para fabricación de bioplásticos ISO, ASTM Y NTC. Las cuales aseguran la calidad y seguridad del producto, así como el cumplimiento de las leyes que respaldan los productos desarrollados que buscan innovación y protección al medio ambiente. Las normas más relevantes para este proyecto se mencionan en el apartado [6.2](#).

Para que el bioplástico sintetizado pueda competir en el mercado a futuro, es fundamental optimizar los costos de materia prima y producción durante la fase de investigación a nivel de laboratorio. Esto implica seleccionar cuidadosamente las materias primas: Se deben buscar alternativas de bajo coste que no comprometan la calidad del bioplástico final. Además, se requiere optimizar los procesos de síntesis y purificación para minimizar el tiempo y los recursos necesarios. Se debe considerar la posibilidad de producir el bioplástico a gran escala de manera rentable.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Bioplásticos

Los polímeros son macromoléculas de alto peso molecular creadas mediante la unión de monómeros por medio de una reacción de polimerización, que origina un material moldeable llamado plástico, clasificado en sintético y natural, dependiendo de su fuente de origen. Los plásticos convencionales están elaborados a partir de derivados del petróleo, y los bioplásticos a partir de material biológico (Godínez et al., 2016) como el almidón de yuca, papa, maíz, residuos del aguacate, entre otros.

En la actualidad, los polímeros son omnipresentes en nuestra vida cotidiana, con una producción anual de aproximadamente 360 millones de toneladas de este material (European Bioplastics, 2022). Su importancia es innegable, ya que desempeñan un papel esencial en la provisión, protección y entrega de productos de alta calidad en prácticamente todos los sectores del mercado global (European Bioplastics, 2022). Además, su versatilidad los ha llevado a ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones, desde industrias manufactureras hasta medicina y automóviles (Higüera et al., 2021).

A pesar de su utilidad en múltiples aplicaciones, el plástico acarrea una serie de problemas significativos, siendo la contaminación del agua, el aire y el suelo su principal preocupación asociada (Higüera et al., 2021). Para abordar esta problemática, se está produciendo un cambio significativo que pone énfasis en la investigación y la promoción del uso de plásticos que reducen la contaminación, con el objetivo de avanzar hacia una economía circular. Este enfoque se alinea con la visión de un mundo sostenible y moderno (European Bioplastics, 2022).

Aunque el bioplástico se clasifique dentro del grupo de los polímeros, adopta un enfoque basado en compartir, reutilizar, renovar y reciclar. Este modelo busca valorizar los productos y materiales, reduciendo al mínimo la generación de desechos. Además, contribuye a mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, optimizando su valor durante su ciclo de vida. Asimismo, se orienta hacia la recuperación y la generación de nuevos productos y materiales al final de su vida útil.

7.1.1 Tipos de bioplásticos

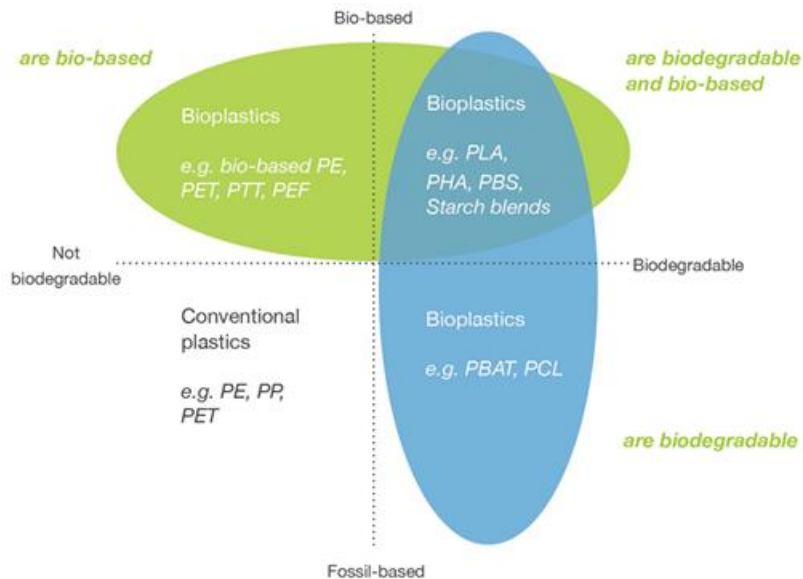
Los bioplásticos al ser una alternativa cada vez más relevante en el panorama de materiales sostenibles, se han diversificado en una amplia gama de tipos para adaptarse a distintas necesidades y aplicaciones. Cada tipo presenta características únicas en cuanto a su composición, propiedades y potencial de uso. Algunos de estos se clasifican por:

Plásticos no biodegradables (no de formas biológicas) como el polietileno (PE) de base biológica, polipropileno, o tereftalato de polimetileno (PET) o polímeros nuevos, como el furanoato de polietileno (PEF). (European Bioplastics, 2022).

Plásticos de origen biológico y biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxicanoatos (PHAs), el succinato de polibutileno (PBS) o diferentes mezclas de almidón. ((European Bioplastics, 2022).

Plásticos basados en recursos fósiles como el tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT), policaprolactona (PCL) y poliamida (PA). ((European Bioplastics, 2022).

Figura 1. Tipos de Bioplásticos.



Fuente. European Bioplastics. (2022, octubre).

7.1.2 Elaboración de bioplásticos procedentes de biomasa

La elaboración de bioplásticos procedentes de biomasa se ha convertido en un enfoque clave en la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Estos bioplásticos se fabrican utilizando materias primas renovables, como almidón de maíz, caña de azúcar, celulosa y otros residuos agrícolas o forestales (Avellán et al., 2019). A través de procesos de fermentación microbiana o transformaciones químicas, estas biomoléculas se convierten en polímeros que pueden ser moldeados en una amplia gama de productos, desde envases hasta textiles (Chariguamán, 2015).

La síntesis de bioplásticos representa un campo en constante evolución, impulsado por la necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los plásticos convencionales. Este proceso comprende una serie de etapas cruciales que van desde la selección de materias primas hasta la fabricación de productos finales. En este contexto, diversos estudios han investigado métodos

innovadores y eficientes para la síntesis de bioplásticos, buscando maximizar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental.

Uno de los enfoques prominentes en la síntesis de bioplásticos es la utilización de polímeros biodegradables derivados de fuentes renovables. La modificación química de polímeros natural ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones. Por ejemplo, Guo et Al (2021) exploraron la modificación del almidón mediante técnicas de plastificación y la incorporación de plastificantes compatibles para mejorar la flexibilidad y resistencia del bioplástico resultante. Estos avances en la modificación de polímeros naturales han permitido la creación de bioplásticos con propiedades ajustables según las necesidades específicas de diversas aplicaciones.

Una vez completada la síntesis del bioplástico, se avanza al crucial proceso de procesamiento y moldeado para darle forma al producto final. Este paso involucra una serie de técnicas especializadas que incluyen extrusión, inyección, termoformado o soplado, adaptadas a las especificaciones particulares del producto deseado (García et al., 2020). Posteriormente, se llevan a cabo exhaustivas pruebas y evaluaciones para verificar las propiedades del bioplástico producido, tales como su resistencia mecánica, flexibilidad, biodegradabilidad y su compatibilidad con el medio ambiente. Estas pruebas son esenciales para asegurar tanto la calidad como el rendimiento óptimo del bioplástico en su aplicación final.

La producción de bioplásticos no solo reduce la dependencia de los recursos fósiles, sino que también puede contribuir a la mitigación del cambio climático al capturar carbono durante el crecimiento de las materias primas. Sin embargo, se requiere un enfoque integral que considere aspectos como la eficiencia en el uso de la tierra, el consumo de agua y energía, así como la gestión adecuada de los residuos, para garantizar que los bioplásticos sean verdaderamente una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Avellán et al., 2019).

7.1.2.1 Bioplásticos a partir de almidón

El almidón es el polisacárido más conocido en la elaboración de los bioplásticos, está formado por amilosa y amilopectina. Si el almidón posee una cantidad alta de amilosa, le proporciona resistencia a la película del polímero y si contiene en mayor proporción amilopectina ramificada, dará como resultado una película con bajas propiedades mecánicas, si se presenta este último escenario se puede mejorar con plastificantes como el glicerol y el sorbitol. (Mali et al., 2002). Estos polisacáridos representan aproximadamente el 98% del peso total del almidón, siendo la amilopectina la más predominante en la composición del compuesto (Higüera et al., 2021).

Desde una perspectiva de aplicación como material polimérico, se pueden identificar dos roles distintos: uno como matriz polimérica, adoptando la forma de almidón termoplástico, y otro como carga nanométrica, presentándose en la configuración de nanocristales (Sessini & Peponi, 2017). Se ha comprobado mediante investigaciones que es viable la producción de películas plásticas flexibles y biodegradables utilizando materiales como el almidón de yuca y pectina, así como también el olote de maíz, la papa, el plátano y otros polímeros. Además, existen patentes que cubren procesos de fabricación específicos para almidones termoplásticos (Avellán et al., 2019).

Independientemente del origen del almidón, ya sea maíz, trigo, yuca, papa o plátano, se emplean dos métodos distintos para su extracción: la molienda seca y la molienda húmeda. En el caso específico del maíz, la molienda seca se utiliza a nivel artesanal, mientras que la molienda húmeda es empleada por grandes industrias para refinar y mejorar los productos derivados de esta planta. El objetivo principal de la molienda húmeda es la obtención de almidón de alta calidad (Avellán et al., 2019).

7.1.2.2 Bioplásticos a partir de la celulosa

La celulosa es biopolímero abundante en la Tierra, se extrae de fuentes vegetales como la madera, el algodón o los residuos agrícolas. Con diversos procesos químicos y físicos, la celulosa puede transformarse en bioplásticos con diferentes propiedades y aplicaciones (Enciclopedia Británica, 2024). Entre las técnicas más comunes se encuentran la extrusión, el moldeo por inyección y el soplado, permitiendo la obtención de biopelículas, envases, fibras, y otros productos (Concepto, 2024).

La celulosa se compone de la unión de sacáridos, unidades menores de azúcar orgánico, formando una cadena larga y compacta. Esta sustancia es insoluble en agua y alcohol, presentando un peso molecular variable (Enciclopedia Británica, 2024). Al igual que otros carbohidratos de origen biológico, la celulosa es combustible y reacciona exotérmicamente con oxidantes fuertes, lo que explica la propagación rápida de los incendios forestales (Concepto, 2024).

Los procesos más conocidos para la obtención de estos bioplásticos son la esterificación y eterificación de los grupos hidroxilo. Para lograr obtener la celulosa como bioplástico en forma de termoplásticos se añaden

7.1.2.3 Bioplásticos a partir de pectina

La pectina es una sustancia soluble en agua que se encuentra en las paredes celulares y tejidos intercelulares de ciertas plantas. En los frutos, su función es mantener unidas las células adyacentes, contribuyendo así a la firmeza y forma de los frutos maduros (Enciclopedia Británica, 2024). Conforme la fruta madura, la pectina se convierte en azúcares simples, volviéndose soluble en agua y haciendo que la fruta se ablande.

La capacidad de la pectina para formar una solución espesa similar a un gel la convierte en un ingrediente clave en la preparación de jaleas, confituras y mermeladas (Enciclopedia Británica, 2024). Además, sus propiedades espesantes se usan en las industrias de confitería, farmacéutica y textil. Se puede extraer de fuentes como las cáscaras de cítricos y el orujo de manzana.

Aparte de su uso en la industria alimentaria y textil, la pectina también ofrece beneficios para la salud humana. Se ha demostrado que reduce los niveles de colesterol al disminuir los niveles de lipoproteínas de baja densidad (LDL) (Enciclopedia Británica, 2024). Además, puede ayudar a aliviar la diarrea al retrasar el paso de los alimentos a través del intestino.

Considerando estas propiedades y su disponibilidad, la pectina se vislumbra como un material prometedor para la producción de bioplásticos, ofreciendo una alternativa sostenible y beneficiosa tanto para el medio ambiente como para la salud humana.

1.1.1 Elaboración de bioplásticos procedentes de proteínas

Las proteínas, complejas sustancias presentes en todos los seres vivos, poseen un valor nutricional significativo y desempeñan un papel fundamental en los procesos químicos esenciales para la vida (Enciclopedia Británica, 2024). Se han ideado materiales basados en proteínas que imitan funciones biológicas y no biológicas, especialmente en propiedades físicas y resistencia mecánica. Esta innovadora estrategia abre nuevas posibilidades para la creación de bioplásticos a base de proteínas (CORDIS, 2024). Aunque aún se encuentra en fase de desarrollo, esta técnica muestra un gran potencial y promete resultados significativos en el futuro.

7.1.3 Bioplástico y plástico convencional.

Los plásticos son polímeros, compuestos químicos constituidos por monómeros que se repiten (Universidad de Burgos, 2024). Los polímeros han estado presentes en forma natural y

constructiva para el hombre tales como la seda, la lana, el algodón, la celulosa, el almidón o el caucho natural. La búsqueda del hombre por materiales más avanzados a bajo costo, sencillos de producir y asequibles llevo al hombre a desarrollar lo que nosotros conocemos como el plástico convencional. El primer plástico patentado surge en 1860 como el resultado de la disolución de celulosa con alcanfor y etanol. Este dio paso a un sinfín de mejoras y alternativas de las cuales surgió el PVC, el polietileno PE y el polipropileno, como las variantes más conocidas (Romero. J, 2005).

En la actualidad, la creciente inquietud por los impactos adversos del plástico convencional en el medio ambiente ha fomentado una intensa investigación y avance hacia alternativas más sostenibles, como el bioplástico (European Bioplastics, 2022). En este escenario, se vuelve esencial examinar y contrastar ambos materiales desde múltiples ángulos, abarcando su composición, propiedades físicas y ambientales, así como su influencia en la salud humana y el equilibrio ecológico.

El bioplástico ha emergido entonces como una alternativa prometedora al plástico convencional, siendo su origen objeto de investigación y desarrollo continuo. Según Auras, Harte, y Selke (2004), el concepto de bioplástico se remonta a los primeros intentos de sintetizar polímeros a partir de materiales biológicos, como almidón y proteínas, en la primera mitad del siglo XX. Desde entonces, su evolución ha sido notable, con avances significativos en la utilización de recursos renovables y la reducción de la dependencia de materias primas no renovables (Koller, Marsalek, Braunegg, y Rodríguez, 2017). Hoy en día, la investigación en bioplásticos se centra en mejorar la eficiencia de producción y las propiedades de los materiales, con el objetivo de ofrecer soluciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Steinbüchel y Valentin, 2013).

En términos de propiedades físicas, ambos materiales pueden exhibir similitudes en resistencia, flexibilidad y durabilidad, aunque la estabilidad térmica y la biodegradabilidad varían significativamente. El plástico convencional tiende a ser resistente a la degradación biológica y persiste en el medio ambiente durante cientos de años, contribuyendo a la contaminación global (Geyer et al., 2017). En contraste, el bioplástico puede degradarse más rápidamente bajo condiciones específicas, lo que reduce su impacto ambiental a largo plazo (Kumar et al., 2019).

El plástico convencional ha sido asociado con la liberación de compuestos tóxicos durante su ciclo de vida, incluyendo aditivos como ftalatos y bisfenol A, que pueden tener efectos adversos en la salud humana y la vida marina (Rochman et al., 2013). Además, la acumulación de microplásticos en los ecosistemas acuáticos plantea preocupaciones sobre la transferencia de contaminantes a través de la cadena alimentaria (Jambeck et al., 2015). Por otro lado, el bioplástico ofrece la posibilidad de reducir la exposición a sustancias químicas nocivas al ser diseñado con materiales biocompatibles y biodegradables, aunque se requiere una gestión adecuada al final de su vida útil para maximizar sus beneficios ambientales (Silva et al., 2020).

7.2 Normativa

La extensa normatividad colombiana para el plástico varía según el área de enfoque y uso final del material. La fabricación de bioplásticos, en particular, se rige por una serie de normas nacionales e internacionales, como las ISO, ASTM y NTC. En este contexto, se presenta un breve resumen de las normas relevantes para la investigación.

Grupo 1: Determinación de propiedades mecánicas de plásticos

Estas normas establecen métodos estandarizados para evaluar el desempeño mecánico de los plásticos, lo cual es fundamental para seleccionar los materiales adecuados según sus aplicaciones y requisitos de diseño.

- NTC 595:2024 - Método colombiano para determinar las propiedades de tracción en plásticos reforzados y no reforzados, utilizando probetas estándar bajo condiciones controladas. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2024)
- ASTM D638-14 - Norma internacional equivalente a la NTC 595 para determinar propiedades de tracción en plásticos. (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2014)
- ISO 527-1:2019 - Norma internacional similar, que especifica un método para determinar propiedades de tracción en plásticos. (International Organization for Standardization [ISO], 2019)
- NTC 942:2020 - Método colombiano específico para evaluar propiedades de tracción en láminas y películas plásticas delgadas (menos de 1 mm de espesor). (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2020)

Grupo 2: Biodegradabilidad y compostaje de plásticos

Estas normas y regulaciones abordan la capacidad de biodegradación de los plásticos en condiciones de compostaje o ambientes naturales, con el fin de mitigar su impacto ambiental.

- ISO 14855-1:2019 - Establece un método para determinar la biodegradabilidad aeróbica final de plásticos en condiciones de compostaje controladas. (International Organization for Standardization [ISO], 2019)
- Ley 2232 de 2022 Art. 34 Par. 1° - Fija requisitos mínimos de biodegradación para productos plásticos en Colombia (50% en 3 años, 85% en 4 años).
- ASTM D6400:2021 / ISO 17088:2021 - Especifica los criterios para etiquetar plásticos aptos para compostaje aeróbico en instalaciones municipales o industriales. (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2021) y (International Organization for Standardization [ISO], 2021)

Grupo 3: Contenido de base biológica en plásticos

Esta norma permite cuantificar el porcentaje de carbono de origen renovable o biológico presente en los plásticos, lo cual es un indicador de su sostenibilidad.

- ISO 16620-2:2019 - Método para determinar el contenido de carbono de base biológica en monómeros, polímeros y productos plásticos mediante medición de ^{14}C . International Organization for Standardization [ISO], 2019)

Grupo 4: Preparación de muestras para ensayo

Esta norma describe los procedimientos adecuados para acondicionar las muestras de plástico antes de realizar pruebas, garantizando resultados confiables.

- NTC 718:2020 - Define los procedimientos de acondicionamiento de plásticos en términos de temperatura, humedad, etc. antes de ensayos. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2020)

Grupo 5: Incentivos a producción de envases biodegradables

Esta regulación colombiana promueve el apoyo financiero y la promoción de envases biodegradables derivados de residuos orgánicos, priorizando a pequeños y medianos productores.

- Ley 2232 de 2022 Art. 10 Par. 1° - Establece incentivos económicos para productores nacionales de envases biodegradables, valorizando residuos agrícolas.

7.3 Sagú (CANNA ENDULIS KER)

El sagú es una planta que prospera en zonas tropicales y subtropicales, mostrando una notable adaptabilidad que le permite crecer desde el nivel del mar hasta altitudes de 2700 metros, y en áreas donde la precipitación anual oscila entre 250 y 4000 mm (Falla *et al.*,2018). Es capaz de tolerar temperaturas que varían entre los 9°C y los 32°C, sin embargo, temperaturas por debajo del mínimo mencionado pueden causar daños debido a heladas y granizos, lo que afecta negativamente la fotosíntesis. Por otro lado, en climas con temperaturas superiores a los 32°C, se acelera la pérdida de agua, lo que repercute negativamente en la producción de carbohidratos. (Borray *et al.*,2003). La humedad relativa óptima para su crecimiento se sitúa entre el 65% y el 90% (Falla *et al.*, 2018).

El cultivo de sagú aporta significativos beneficios a los ecosistemas, ya que mejora la estructura del suelo, incrementa su fertilidad y contribuye a la generación de oxígeno, además de capturar CO₂. (Corpoica, 2003).

Geográficamente, el sagú se distribuye desde México hasta Argentina, siendo Colombia, Perú y Ecuador los principales países productores. También se encuentra presente en Taiwán, China y Vietnam (Lobo *et al.*, 2017). En Colombia, se cultiva sagú en los departamentos de Cundinamarca, Huila, Nariño y Cauca (Yaruro Cáceres, 2018).

7.3.1 Almidón de Sagú (CANNA ENDULIS KER)

El almidón de sagú se usa para elaborar diversos alimentos, como biscochos, pan y achiras (Lobo *et al.*, 2017). Su uso en la industria depende de propiedades clave, como la gelatinización, retrogradación, solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles (Granados C. *et al.*, 2014). Por otro lado, los residuos son aprovechados para la elaboración de artesanías o para envolver alimentos (Falla *et al.*, 2018).

El almidón de sagú se extrae del ribosoma de la planta, que es ovoide y puede medir hasta 15 cm de largo y 12 de ancho (Corpoica, 2003).

El lavado del ribosoma constituye el primer paso en el proceso de extracción del almidón. En esta etapa, se limpian los ribosomas para eliminar cualquier rastro de tierra u otras impurezas que se les adhieren. Este proceso implica una agitación adecuada seguida de una separación por sedimentación para asegurar la eliminación completa de las impurezas.

Después de completar el lavado, se procede a romper las paredes celulares para extraer el almidón. Esta etapa implica el rallado de los materiales, que puede realizarse manualmente o con el uso de maquinaria especializada. También es posible optar por el método de licuado para lograr el mismo objetivo. En ambos casos, el propósito es fragmentar las células para liberar el almidón contenido en su interior.

Después del rallado, la masa se somete a un proceso de tamizado. Durante este proceso, se agrega agua gradualmente mientras se pasa la masa por un tamiz. Esto permite que el almidón se disperse en el agua y pase a través del tamiz, mientras que el afrecho, o las partículas más grandes no deseadas, quedan retenidas en el tamiz. De esta manera, se logra separar el almidón del afrecho y obtener un producto más puro.

Una vez se obtiene una lechada más limpia, se procede con el proceso de lavado del almidón. El objetivo principal de esta etapa es obtener un producto final de almidón de alta calidad, libre de residuos e impurezas. El proceso de lavado del almidón se lleva a cabo en pasos sucesivos que incluyen la adición de agua, la decantación del almidón y la eliminación del agua.

En el último paso del proceso, la lechada se seca para eliminar el exceso de humedad y obtener el almidón en forma de polvo. Tradicionalmente, esta tarea se realiza de manera artesanal, extendiendo la lechada en patios al aire libre y permitiendo que el sol elimine gradualmente la humedad. Sin embargo, esta práctica puede comprometer la calidad del almidón al exponerlo a la contaminación por diversos microorganismos. Por esta razón, en la industria se recurre a secadores artificiales que generan calor mediante el uso de combustibles. Estos secadores permiten controlar con precisión las condiciones de secado, asegurando así la calidad del almidón. Además, el almidón se seca en cámaras especiales, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación microbiológica y garantiza un producto final de alta calidad y pureza.

7.3.2 Características del almidón

Las características y composición del almidón de sagú están sujetas a variaciones determinadas por diversos factores, como las condiciones ambientales, los métodos de extracción y purificación empleados, el tipo de fertilizantes utilizados y las características del suelo, entre otros (Yaruro Cáceres, 2018).

Tabla 1. Composición Química (%) del almidón.

Componentes	Porcentajes
Humedad	10.4
Proteína Cruda	0.65
Grasa Cruda	0.36
Fibra Cruda	0.06
Cenizas	0.21

Fuente. (Granados C. *et al.*, 2014)

Otras características fisicoquímicas se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del almidón.

Características	Valor
Solubilidad	4 g /100ml
Capacidad de hinchamiento	106%
Capacidad de retención de agua	162.8%
Contenido de amilasa	23%
Contenido de amilopectina	77%
Temperatura de Gelatinización	65-75°C

Fuente. (Granados C. *et al.*, 2014).

7.4 Orejero (ENTEROLOBIUM CYCLOCARPUM)

El orejero, piñón de oreja, es un árbol que puede medir hasta 30 metros de altura, siendo más ancho que alto. Se encuentra distribuido en zonas tanto secas como subhúmedas, desde México hasta Brasil, y ha sido introducido en lugares como Indonesia y Australia (Calle *et al.*, 2020). El orejero produce un fruto en una vaina ovoide y aplanada. Esta vaina, de color café, puede

medir entre 8 y 10 cm de longitud. En su interior, contiene semillas con forma de almendra (Roa, 2016), cada vaina tiene entre 5 a 20 semillas. Un árbol en promedio puede producir anualmente 725 kg de fruto (Pacheco., 2018).

Figura 2. Orejero.



Fuente. (Pacheco., 2018).

El árbol contribuye significativamente a mejorar la calidad del suelo. Aporta nutrientes importantes como nitrógeno, fósforo, magnesio, calcio y potasio, que son esenciales para la restauración y fertilidad del suelo. Incluso puede crecer en suelos con poca fertilidad, lo que lo convierte en una opción valiosa para la recuperación de terrenos degradados. (Serratos *et al.*, 2008).

7.4.1 Composición del fruto

El orejero se distribuye principalmente en la Costa Atlántica de Colombia, así como en los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca, Huila, Tolima, Caquetá, Meta y Casanare (Roa, 2016). Las propiedades fisicoquímicas de sus frutos varían según la región, siendo influenciadas por el tipo de suelo predominante.

Las vainas del orejero son una valiosa fuente de proteína cruda, con un contenido que oscila entre el 32% y el 41%. Además, estas vainas contienen una diversidad de 17 aminoácidos, carbohidratos y azúcares. (Serratos *et al.*, 2008).

A continuación, se presentan las composiciones de los frutos del orejero, tanto de la vaina completa como de la semilla, en base húmeda y en base seca. Estos datos fueron recopilados por un grupo de investigadores en el año 2008.

Tabla 3. Composición química de orejero.

Base húmeda	%	Base seca	%
Materia seca	73.0		
Humedad	27.0		
Proteína cruda	19.2	Proteína cruda	26.3
Grasa cruda	2.0	Grasa cruda	2.8
Cenizas totales	2.1	Cenizas totales	2.9
Fibra cruda	3.6	Fibra cruda	4.9
ELN	46.1	ELN	63.1

Fuente. (Serratos et al., 2008).

Tabla 4. Composición química de la semilla de orejero.

Base húmeda	%	Base seca	%
Materia seca	94.14	-	-
Humedad	5.86	-	-
Proteína cruda	32.5	Proteína cruda	34.5
Grasa cruda	7.13	Grasa cruda	7.6
Cenizas totales	3.15	Cenizas totales	3.3
Fibra cruda	0	Fibra cruda	0
ELN	51.36	ELN	54.6

Fuente. (Serratos et al., 2008).

7.4.2 Usos

La madera del orejero se caracteriza por ser ligera y fácil de trabajar, lo que la hace ideal para la elaboración de muebles y canoas (Serratos *et al.*, 2008). Las semillas, por su alto contenido proteico, se usan para fabricar suplementos dietéticos para el ganado bovino. Además, las semillas son consumidas por los seres humanos en guisos y sopas, especialmente en México (Roa., 2016). En Colombia, se emplean para la elaboración de dulces y también se pueden aprovechar en la fabricación de jabones, en la medicina tradicional y para la creación de artesanías. (Calle *et al.*,2020). Así mismo el árbol en sí, es muy apreciado por dar sombra en los grandes terrenos al ganado y mejorar la calidad del suelo.

7.5 La Economía circular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

7.5.1 Economía circular

La economía circular emerge como un modelo de consumo y posconsumo que abraza el principio de las 3 R: reducir, reusar y reciclar. Este enfoque tiene como objetivo reemplazar el sistema tradicional de "usar y desechar" (Prieto *et al.*, 2017). Busca prolongar el ciclo de vida de los productos, promoviendo una gestión más eficiente de los recursos y minimizando la generación de residuos. La economía circular propone un sistema más sostenible y regenerativo, donde los recursos se utilizan de forma más inteligente y se reduce significativamente el impacto ambiental, asegurando así un planeta para las futuras generaciones.

Según datos de la ONU de 2022, la población mundial ha superado los 8 mil millones de habitantes. Este crecimiento demográfico, junto con el desarrollo económico e industrial, ha provocado un consumo desproporcionado de los recursos naturales, en aras de generar bienestar y comodidad (Martínez *et al.*,2018). La predominancia de servicios y productos no renovables ha impulsado una economía lineal, que a su vez engendra múltiples problemas. Entre estos se destacan

la generación desmesurada de basura, originada por el constante consumo de bienes con vida útil limitada (Delgado *et al.*, 2022). Esta acumulación masiva de desechos sobrecarga los sistemas de gestión de residuos y contribuye a la contaminación del suelo, el agua y el aire. Además, la extracción continua de recursos no renovables conlleva la degradación y destrucción de los ecosistemas, erosionando la biodiversidad y comprometiendo los servicios ecosistémicos esenciales. Este patrón económico también puede provocar aumentos en los precios de los productos básicos, generando desequilibrios económicos que afectan la estabilidad general (Iglesia González., 2020).

7.5.2 Residuos Agroindustriales

La agroindustria es el sector industrial que utiliza materias primas del ámbito agrícola, pecuario o ganadero para desarrollar productos alimenticios. En este proceso, se añade valor a productos que provienen directamente de la agricultura o la ganadería (González Álvarez, 2013).

Esta actividad genera residuos, muchos orgánicos y con un tiempo de descomposición corto. Aunque estos residuos son biodegradables, su disposición final es un desafío importante por los costos asociados y los posibles impactos ambientales (Peñaranda González et al., 2017), que incluyen altas concentraciones de CO₂ en vertederos o por quema, acumulación que genera infestación de animales como ratas puede representar un riesgo significativo para la salud humana, ya que estos roedores transmiten diversas enfermedades a las personas, acumulación en fuentes hídricas, entre otras (Vargas Corredor & Pérez, 2018).

Actualmente, se trabaja activamente en aprovechar los residuos para agregar valor en la cadena de producción, a la vez que se adopta el concepto de economía circular. Este enfoque busca minimizar la cantidad de residuos destinados a vertederos. En lugar de desechar los residuos, se busca reintegrarlos en el ciclo productivo, ya sea mediante su reutilización, reciclaje o

recuperación de recursos. De esta manera, se promueve una gestión más sostenible de los recursos, se reducen los impactos ambientales y se fomenta la eficiencia en el uso de materiales.

Algunos residuos agroindustriales son utilizados para la producción de alimento para animales, biocombustibles o bioabonos (Vargas Corredor & Pérez, 2018). Otros como los desechos de los cítricos, se aprovechan para extraer pectinas, fibra y aceites esenciales aprovechados en farmacéuticas y cosméticas (Peñaranda González et al., 2017).

Actualmente, se están realizando investigaciones para aprovechar el potencial de los residuos agroindustriales. Es importante destacar que estos residuos pueden ser de gran provecho, siempre y cuando su recolección se realice en las mejores condiciones posibles. Una recolección adecuada garantiza la calidad y la cantidad de los residuos disponibles para su posterior procesamiento y aprovechamiento en diversas aplicaciones.

8. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN MIXTO

8.1 Enfoque de la investigación: Experimental y descriptivo

La investigación se llevará a cabo mediante un enfoque mixto, combinando procedimientos experimentales y descriptivos para obtener un biopolímero óptimo a partir de sagú (CANNA ENDULIS KER) y orejero (ENTEROLOBIUM CYCLOCARPUM), teniendo en cuenta su disponibilidad, propiedades y potencial para la producción. Se variarán las proporciones de ambas materias primas y se evaluará su impacto en las propiedades del biopolímero resultante.

Paralelamente, se empleará un enfoque descriptivo para caracterizar y describir el biopolímero obtenido en el experimento. Esto se logrará mediante la realización de pruebas de laboratorio para evaluar sus propiedades físicas y químicas, tales como viscosidad, densidad,

temperatura de fusión, resistencia mecánica, capacidad de absorción de agua, biodegradabilidad, resistencia a la humedad y compatibilidad con otros materiales, utilizando métodos específicos.

Además, se llevará a cabo una validación de la calidad del biopolímero y la efectividad del proceso de elaboración mediante la comparación de los resultados obtenidos con la literatura científica existente. Esto permitirá confirmar la consistencia y fiabilidad de los hallazgos, así como identificar posibles áreas de mejora o innovación en el desarrollo del biopolímero.

9. VARIABLES CUANTITATIVAS.

Balance de masa: Esta variable se refiere a la cantidad de materia prima utilizada en relación con la producción de bioplástico. Incluye el seguimiento de la cantidad de almidón de sagú y residuo de orejero utilizados en el proceso, así como la cantidad de bioplástico obtenido y cualquier otro subproducto o residuo generado durante la producción.

Balance de energía: Esta variable se centra en la cantidad de energía necesaria para llevar a cabo el proceso de obtención de la biopelícula. Incluye la energía requerida por los equipos de laboratorio.

Costos de producción: Con dicha variable se analizan todos los costos asociados con la producción de bioplástico a nivel de laboratorio. Esto abarca el costo de la materia prima (almidón de sagú y residuo de orejero), los costos de energía, los costos de mano de obra, los costos de equipos y materiales utilizados en el proceso, así como cualquier otro gasto relacionado.

Tiempos de producción: Esta variable se refiere al tiempo necesario para llevar a cabo cada etapa del proceso. Incluye el tiempo de preparación de la materia prima, el tiempo de procesamiento, el tiempo de secado y cualquier otro tiempo adicional del proceso.

10. VARIABLES CUALITATIVAS.

Composición fisicoquímica del bioplástico: Con esta variable se logra conocer las propiedades fisicoquímicas, como su estructura molecular, peso molecular, propiedades térmicas, propiedades mecánicas, entre otras.

Disponibilidad materia prima: Esta variable evalúa la disponibilidad y accesibilidad de la materia prima necesaria para la elaboración a nivel local, considerando factores como la estacionalidad de la materia prima y su demanda en otras industrias.

Materiales y equipos: Refiere a la calidad y disponibilidad de los materiales y equipos utilizados durante cada etapa, incluyendo su eficiencia y costo.

Pruebas de caracterización: Se abarca las pruebas y análisis realizados para caracterizar el bioplástico, como pruebas de resistencia mecánica (elongación y tensión), pruebas de degradación (tierra, agua, medios salinos, medios ácidos), entre otras pruebas relevantes para evaluar la calidad y futuras aplicaciones de este.

11. SELECCIÓN Y DESARROLLO DE SOLUCIÓN.

11.1 Selección de la Solución

El bioplástico seleccionado para esta investigación se basa en almidón, uno de los más comunes y obtenidos mediante la gelatinización y posterior procesamiento del compuesto. Se dispone de almidones para ello, incluyendo sagú, maíz, trigo o papa. En este estudio, se ha optado por el almidón de sagú debido a sus ventajas como materia prima para la producción de bioplásticos. Las propiedades mecánicas, térmicas y químicas superiores del almidón de sagú, en comparación con otros tipos de almidón, lo hacen una opción muy atractiva para la fabricación de productos ecológicos y sostenibles (Dewi et al., 2022).

El bioplástico a base de almidón de sagú ha surgido como una alternativa prometedora para abordar la creciente preocupación por la contaminación plástica. Este biopolímero se deriva del sagú, una planta abundante en muchas regiones del mundo. Investigadores como Hernández, J, Medina, O y Coha, P (2017) han llevado a cabo estudios pioneros en la caracterización del sagú para la producción de bioplásticos utilizando almidón de este como materia prima. Sus investigaciones han demostrado que estos bioplásticos son biodegradables y tienen propiedades similares a los plásticos convencionales, lo que los convierte en una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Además, el uso de almidón de sagú como base para el bioplástico también puede ofrecer una nueva fuente de ingresos para los agricultores locales, promoviendo así el desarrollo económico en áreas rurales.

Aunque el almidón de sagú presenta ventajas significativas en la producción de bioplásticos, su uso en un 100% puede presentar ciertos desafíos técnicos y económicos. En primer lugar, el almidón de sagú tiene una estructura molecular compleja que puede requerir procesos adicionales de modificación para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia y la flexibilidad, para que el bioplástico resultante sea adecuado para aplicaciones específicas. Además, la disponibilidad y el costo del almidón de sagú pueden variar según la región y la temporada, lo que podría afectar la viabilidad económica de la producción a gran escala (Li, Zhang, & Gu, 2018). Por lo tanto, los investigadores y la industria continúan explorando la optimización de las formulaciones de bioplásticos mediante la combinación de almidón de sagú con otros materiales biodegradables y de fuentes renovables para lograr un equilibrio óptimo entre rendimiento, costo y sostenibilidad.

Una de las áreas de investigación más destacadas se ha centrado en la modificación de la estructura molecular de los almidones mediante técnicas como la modificación química y la

incorporación de aditivos compatibles. Por ejemplo, un estudio realizado por Collí (2018) en el Centro de Investigación Científica de Yucatán exploró el potencial del árbol *Enterolobium cyclocarpum*, comúnmente conocido como "Árbol de orejero", para la producción de bioplásticos. Este estudio incluyó un análisis fisicoquímico del fruto de dicho árbol, demostrando la factibilidad de obtener un termoplástico a partir exclusivamente de este recurso natural. Sin embargo, se encontró que el proceso resulta ser altamente costoso para la producción a gran escala. Además, se descubrió que la incorporación de partículas molidas de la semilla del orejero en el bioplástico mejoraba sus propiedades, otorgándole características fibrosas y de adhesión (Collí, 2018). Aunque este hallazgo representa un avance significativo, aún se requiere investigación adicional para optimizar los procesos y reducir los costos asociados con la producción de bioplásticos a partir de recursos naturales como el orejero.

11.2 Desarrollo de Solución

En un país como Colombia, la producción de bioplásticos a base de almidón de sagú (*Canna edulis Ker*) se presenta como una opción ideal por varias razones. En primer lugar, el sagú es una planta nativa de la región que puede cultivarse de manera sostenible, lo que reduce la dependencia de materias primas importadas y contribuye al desarrollo económico local (Ortega et al., 2020). Además, el sagú es una fuente abundante de almidón, una macromolécula natural que se puede transformar en bioplásticos biodegradables y compostables, lo que ayuda a mitigar el problema de la contaminación plástica (Hernández. J et al., 2017). Al utilizar recursos renovables locales como el sagú, Colombia puede promover la innovación en la industria biotecnológica y fortalecer su posición como líder en sostenibilidad ambiental en la región. Por lo tanto, la elección de generar bioplásticos a partir de almidón de sagú en Colombia no solo es estratégica desde el punto de vista

ambiental y económico, sino que también resalta el compromiso del país con la protección del medio ambiente y el uso responsable de los recursos naturales.

La elección de producir bioplásticos a base de sagú con aditivos que brinden fibra se justifica por sus múltiples beneficios. Según investigadores como García-López, B., Velasco-Santos, C., Ortega-Gudino, P., y Castaño, V. M. (2012), la adición de fibras naturales mejora significativamente las propiedades mecánicas de los bioplásticos, aumentando su resistencia y durabilidad. Además, estudios como el de Reddy, N. y Yang, Y. (2009) indican que la incorporación de fibras en bioplásticos de almidón puede prolongar su vida útil y reducir la generación de residuos al mejorar su resistencia a la degradación. Este enfoque también responde a la necesidad de promover prácticas industriales sostenibles, como señalan autores como Pandey, J. K., Ahn, S. H., Lee, C. S., y Mohanty, A. K. (2011), al fomentar el uso de recursos renovables y reducir la dependencia de materiales no renovables. En consecuencia, la elección de bioplásticos de sagú con aditivos de fibra no solo se alinea con los principios de sostenibilidad ambiental, sino que también puede impulsar la innovación tecnológica y el desarrollo económico en Colombia.

La investigación para la producción de bioplásticos a partir de almidón de sagú y la cáscara del orejero se muestra como una perspectiva prometedora en el campo de los materiales sostenibles, especialmente en Colombia. El sagú, una planta nativa de varias regiones tropicales, es una fuente rica en almidón (Borém & Filgueiras, 2009), mientras que la cáscara del orejero, un subproducto agrícola comúnmente desechado, contiene una gran cantidad de fibra, celulosa y lignina (Díaz et al., 2018). La combinación de estos dos materiales ofrece una oportunidad única para desarrollar bioplásticos con propiedades mejoradas y una huella ambiental reducida.

Investigaciones preliminares indican que la mezcla de almidón y cáscara de orejero podría producir bioplásticos con características deseables, como resistencia mecánica y biodegradabilidad

(Collí, 2018). Además, el uso de estos recursos renovables y abundantes contribuye a la mitigación de residuos agrícolas y a la reducción de la dependencia de materias primas no renovables. Por lo tanto, la investigación en esta área no solo puede impulsar el desarrollo de materiales eco amigables y también ofrecer soluciones innovadoras para abordar desafíos ambientales y promover la sostenibilidad en diversas industrias.

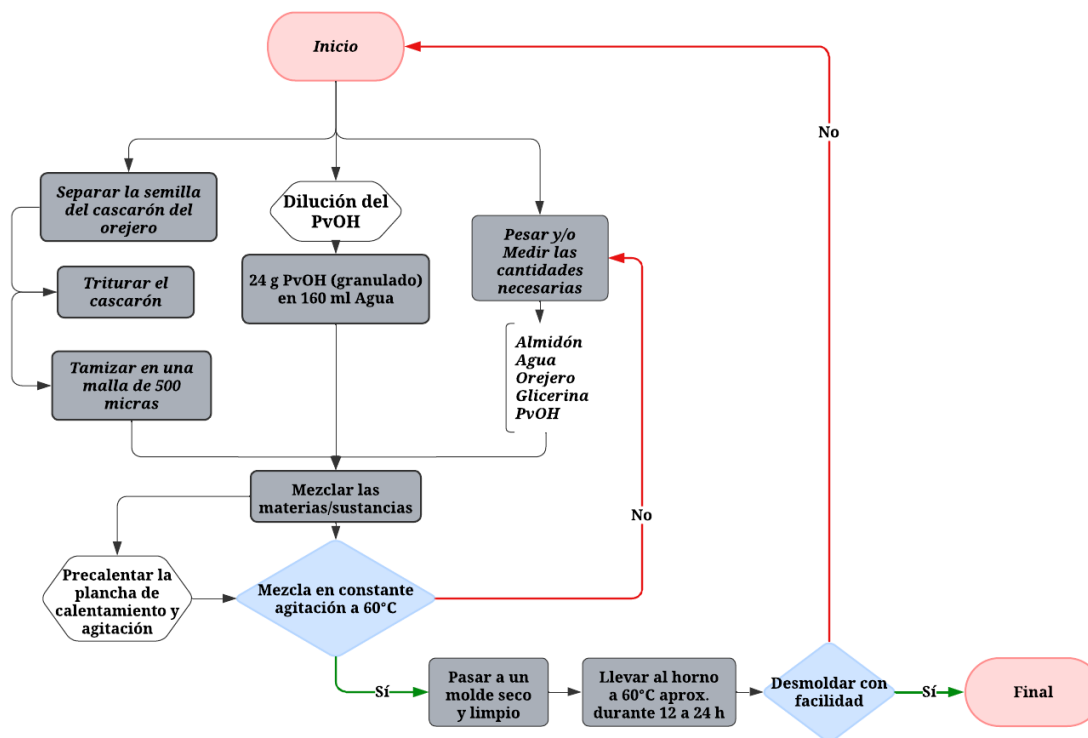
12. RESULTADOS.

12.1 Formación de biopelícula

El desarrollo de bioplásticos ha ganado prominencia en la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Las biopelículas destacan entre las diversas formas de bioplásticos por su versatilidad y potencial aplicativo en campos industriales, desde embalajes hasta productos médicos (Smith, 2019, p. 45). Estas biopelículas, obtenidas a partir de fuentes renovables como almidón, celulosa o proteínas, representan una innovación significativa en la ingeniería de materiales, fusionando aspectos de biotecnología y procesamiento industrial (Jones & García, 2020).

En este contexto, la figura 3 muestra el diagrama del proceso el cual ilustra de manera concisa y sistemática las etapas claves involucradas en la producción de la biopelícula. Cada fase del proceso se encuentra diseñada para garantizar la calidad del prototipo final. Este diagrama ofrece una visión general para comprender la secuencia de operaciones necesarias en la fabricación de biopelículas, sirviendo como una herramienta para investigaciones posteriores.

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso.



Fuente. Elaboración propia.

12.1.1 Cronograma de desarrollo

El siguiente cronograma detalla el proceso de elaboración de biopelículas mediante la generación de bioplástico, desde la preparación de los materiales hasta la formación y caracterización de las biopelículas resultantes.

La importancia de este cronograma radica en su capacidad para estructurar y organizar las actividades realizadas, garantizando así la coherencia temporal y la optimización de recursos durante todo el proceso de fabricación. Además, proporciona una guía clara para el seguimiento del progreso, la identificación de posibles desviaciones y la toma de decisiones oportunas para el éxito del estudio.

En la tabla 5 se observa el cronograma de actividades realizadas para hallar la síntesis correcta para la producción de la biopelícula.

Tabla 5. Cronograma de actividades.

PROCESO DE PRODUCCIÓN SÍNTESIS BIOPELÍCULA			
Fecha	Lugar	Actividad	Descripción
19/02/2024	Laboratorio de Química Universidad Ean calle 74	Elaboración básica de síntesis de bioplástico convencional.	La elaboración de bioplástico convencional implica mezclar materias primas renovables y aditivos para formar el bioplástico mediante reacciones químicas controladas. Es una actividad clave en la fabricación de bioplásticos.
12/03/2024	Laboratorio de Química Universidad Ean calle 74	Proceso de tamizaje del cascarón del fruto de orejero	El tamizaje del cascarón del fruto de orejero implica pasar el material a través de tamices para separar las partículas según su tamaño, asegurando uniformidad y eliminando impurezas para su uso en la síntesis de bioplásticos.
21/03/2024	Laboratorio de Biología Universidad Ean calle 74	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 1)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.
26/03/2024	Ean Legacy	Sesión de retroalimentación	Reunión donde se discuten resultados y se comparten observaciones para identificar áreas de mejora y fortalezas. Su objetivo es promover el aprendizaje y la mejora continua.
11/04/2024	Laboratorio de Biología Universidad Ean calle 74	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 2)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.
16/04/2024	Ean Legacy	Sesión de retroalimentación	Reunión donde se discuten resultados y se comparten observaciones para identificar áreas de mejora y fortalezas. Su objetivo es

			promover el aprendizaje y la mejora continua.
23/04/2024	Laboratorio Privado	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 3)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.
25/04/2024	Reunión por Meet	Sesión de retroalimentación	Reunión donde se discuten resultados y se comparten observaciones para identificar áreas de mejora y fortalezas. Su objetivo es promover el aprendizaje y la mejora continua.
26/04/2024	Laboratorio Privado	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 4)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.
30/04/2024	Laboratorio de Biología Universidad Ean calle 74	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 5)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.
2/05/2024	Ean Legacy	Sesión de retroalimentación	Reunión donde se discuten resultados y se comparten observaciones para identificar áreas de mejora y fortalezas. Su objetivo es promover el aprendizaje y la mejora continua.
3/05/2024	Laboratorio Privado	Elaboración básica de síntesis de bioplástico a partir de Sagú y residuo del fruto de árbol de Orejero. (PRUEBA 6 Y 7)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.

4/05/2024	Ean Legacy	Sesión de retroalimentación	Reunión donde se discuten resultados y se comparten observaciones para identificar áreas de mejora y fortalezas. Su objetivo es promover el aprendizaje y la mejora continua.
6/05/2024	Laboratorio Privado	Elaboración de réplica de muestra 7 como muestra exitosa. (PRUEBA 8)	La elaboración de bioplástico con sagú y residuo de árbol de Orejero implica mezclar estos materiales con aditivos y catalizadores en un proceso de reacción química controlada para obtener un bioplástico utilizable en diversas aplicaciones.

Fuente. Elaboración propia.

12.1.2 Materiales e instrumentos utilizados para la fabricación de las biopelículas

Para fabricar y estudiar las biopelículas a partir de bioplástico hecho con almidón de sagú y residuo del fruto del árbol de orejero, se necesitan materiales e instrumentos para su manipulación y análisis.

Los instrumentos y materiales definidos en las tablas 6 y 7 respectivamente están estipulados para la fabricación en laboratorio en escala experimental y se utilizó en proporciones dinámicas en cada una de las pruebas relacionadas al proyecto.

Tabla 6. Lista de instrumentos.

INSTRUMENTO	CANTIDAD
Plancha de calentamiento	4
Varilla de agitación	4
Agitador magnético	2
Vaso de precipitado de 250 ml	4
Vaso de precipitado de 100ml	4
Cajas Petri	4
Pipeta	4
Molino de finos	1

Tamiz N° 35	1
Horno para secado	1
Termómetro	2
Balanza analítica	1
Molde de plástico	2

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7. Lista de materiales.

MATERIALES	CANTIDAD
Glicerina	100 ml
PvOH	50 g
Agua Destilada	600 ml
Cascarón de fruto de árbol de orejero	300 g
Almidón de Sagú	500 g

Fuente. Elaboración propia.

12.2 Resultados búsqueda síntesis ideal para la formación de biopelículas

La búsqueda de la síntesis ideal para la formación de biopelículas ha sido un objetivo primordial en el desarrollo de materiales bioplásticos con propiedades óptimas. Los resultados de esta investigación son cruciales para avanzar en la comprensión de los procesos de formación de biopelículas y optimizar su rendimiento para futuras aplicaciones industriales.

En este contexto, el presente estudio se centra en la evaluación y comparación de diferentes métodos de síntesis con el fin de identificar la ruta más eficiente y sostenible para la producción de biopelículas. Los hallazgos de esta investigación ofrecen una visión integral sobre las técnicas más prometedoras y los materiales más adecuados para la fabricación de biopelículas, contribuyendo así al avance continuo en el campo de los materiales bioplásticos y su aplicación.

En el proceso experimental, se realizaron disoluciones para preparar las muestras de biopelículas. En primer lugar, se preparó una disolución inicial utilizando 60 gramos de PvOH

granulado, los cuales se disolvieron en 500 ml de agua, esta mezcla se utilizó para las pruebas desde la 1 hasta la 7. Posteriormente, se procedió a preparar una segunda disolución utilizando 24 gramos de PvOH granulado, los cuales se disolvieron en 160 ml de agua. Estas disoluciones se utilizaron en etapas posteriores del experimento para continuar con la evaluación de las propiedades de las biopelículas obtenidas.

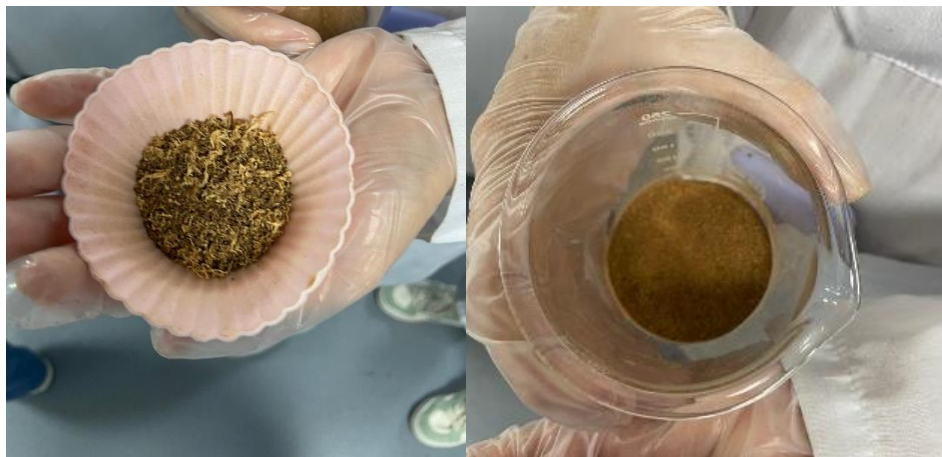
Figura 4. Disolución PvOH.



Fuente. Elaboración propia.

La trituration del cascarón del fruto del árbol de orejero fue fundamental en la preparación del material para las síntesis. Este paso resultó esencial para garantizar que el material estuviera en condiciones óptimas y consistentes, facilitando su integración uniforme en las mezclas utilizadas en la síntesis de biopelículas. Al someter el cascarón a un proceso de trituration adecuado, se obtuvo una textura más homogénea, lo que permitió unirse a la mezcla de manera eficiente, contribuyendo a la obtención de biopelículas lisas y de calidad. Este proceso de trituration no solo facilitó la manipulación del material, sino que también optimizó su capacidad de unión y su comportamiento durante las etapas subsiguientes del proceso de síntesis.



Figura 5. Trituración y tamizado del cascarón del fruto de árbol de orejero.



Fuente. Elaboración propia.



A continuación, se presentan tablas e imágenes que detallan los resultados de cada ensayo para encontrar la síntesis óptima. Estas tablas ofrecen datos cuantitativos sobre parámetros clave, como composición de mezclas y propiedades finales de las biopelículas. Las imágenes proporcionan una representación visual de las muestras, destacando características importantes como textura y uniformidad. Esta combinación ofrece una visión completa de los resultados, facilitando su análisis e interpretación.

Tabla 8. Prueba 1.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Inicial	Muestra Final
Almidón Sagú	15 g	-		
Orejero	2.0017 g	-		
PvOH	3.84 g	3.6 ml		
Glicerina	-	4 ml		
Agua	53.25 g	54.2 ml		


Fuente. Elaboración propia.

Tabla 9. Prueba 2.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Inicial	Muestra Final
Almidón Sagú	10.61 g	-		
Orejero	2.0055 g	-		
PvOH	2.28 g	2.4 ml		
Glicerina	-	4 ml		
Agua	76.14 g	77 ml		


Fuente. Elaboración propia.

Tabla 10. Prueba 3.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Final
Almidón Sagú	21 g	-	
Orejero	4.0035 g	-	
PvOH	6.03 g	5.06 ml	
Glicerina	-	4.4 ml	
Agua	149.71 g	153 ml	



Fuente. Elaboración propia.

Tabla 11. Prueba 4.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Final
Almidón Sagú	18 g	-	
Orejero	2.0069 g	-	
PvOH	-	8 ml	
Glicerina	-	10 ml	
Agua	146.82 g	150 ml	

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 12. Prueba 5.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Inicial	Muestra Final
Almidón Sagú	18g	-		
Orejero	2.00g	-		
PvOH	8 g	8 ml		
Glicerina	7.0g	5 ml		
Agua	148.0 g	150 ml		


Fuente. Elaboración propia.

Tabla 13. Prueba 6, Blanco/Sagú.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Inicial	Muestra Final
Almidón Sagú	36.09 g	-		
PvOH	-	16 ml		
Glicerina	-	20 ml		
Agua	296.33 g	300 ml		


Fuente. Elaboración propia.

Tabla 14. Prueba 7.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Final
Almidón Sagú	36 g	-	
Orejero	1.00 g	-	
PvOH	-	16 ml	
Glicerina	-	20 ml	
Agua	286 g	300 ml	

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 15. Prueba 8, replica prueba 7.

Materia prima	Cant. Masa	Cant. Volumen	Muestra Final
Almidón Sagú	36 g	-	
Orejero	1.00 g	-	
PvOH	-	16 ml	
Glicerina	-	20 ml	
Agua	286 g	300 ml	

Fuente. Elaboración propia.

Figura 7. Comparación pruebas 6,7 y 8.



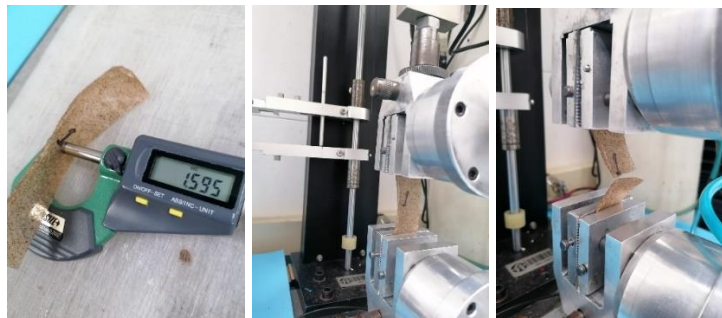
Fuente. Elaboración propia.

12.3 Pruebas de caracterización de la biopelícula.

Se realizaron diversas pruebas de caracterización, centrándose especialmente en la evaluación de la tensión-elongación y resistencia de las biopelículas. Estas pruebas son fundamentales para comprender las propiedades mecánicas y la viabilidad de estas biopelículas en aplicaciones prácticas, las maquinas usadas fueron el micrómetro digital para exteriores para medir el espesor de la probeta y la maquina universal de ensayos para medir tensión-elongación.

Se tomó como referencia la norma ASTM D882 para las pruebas de tensión - elongación, con separación de Gaps o mordazas en 50mm y a una velocidad de 500mm/min, y la norma ASTM E252 como referencia para el calibre.

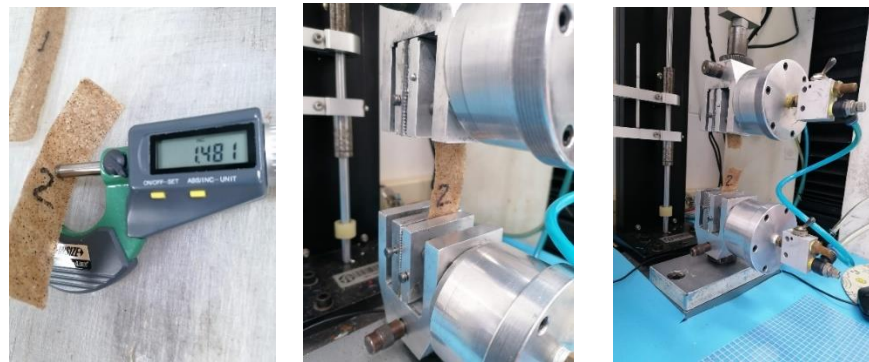
Figura 8. Ensayo 1 con prueba 7.



Fuente. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 6. Se llevo a cabo un ensayo de elongación con una probeta de 50 mm de largo, 25.4 mm de ancho y 1.595 mm de espesor, partiendo de dicha probeta de obtuvo los siguientes resultados: tensión de 78.91 N, deformación de 33.8 mm, elongación del 67.56% y esfuerzo de 1.95 N/mm².

Figura 9. Ensayo 2 con prueba 8.



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 7 se llevó a cabo un ensayo de elongación con una probeta de 50 mm de largo, 25.4 mm de ancho y 1.481 mm de espesor, partiendo de dicha probeta de obtuvo los siguientes resultados: tensión de 39.28 N, deformación de 9.2 mm, elongación del 18.48% y esfuerzo de 1.04 N/mm².

Figura 10. Ensayo 3 con prueba 6, blanco.



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 7 se llevó a cabo un ensayo de elongación con una probeta de 50 mm de largo, 25.4 mm de ancho y 1.535 mm de espesor, partiendo de dicha probeta se obtuvo los siguientes resultados: tensión de 34.52 N, deformación de 7.4 mm, elongación del 14.8% y esfuerzo de 0.89 N/mm².

Pruebas de biodegradabilidad

Para evaluar la biodegradabilidad de la prueba número 7, se llevaron a cabo tres pruebas distintas en diferentes medios: tierra, agua y salmuera. A continuación, se describe el diseño de estas pruebas y las condiciones en las que se realizaron:

Tabla 16. Pruebas de Biodegradabilidad - Fase inicial.

	Prueba en tierra	Prueba en agua	Prueba en salmuera
Fecha de inicio	16 de mayo de 2024	16 de mayo de 2024	16 de mayo de 2024
Condiciones	La muestra fue colocada en un recipiente con tierra a un pH de 7 y se dejó destapada al medio ambiente. Se aseguró que la muestra estuviera totalmente sumergida en la tierra para simular condiciones naturales de descomposición	La muestra fue colocada en un recipiente con agua con un pH de 7 y se dejó destapada al medio ambiente. La muestra permaneció sumergida en el agua durante la prueba, imitando un entorno acuático.	La muestra fue colocada en un recipiente con salmuera (solución de agua con alta concentración de sal) con un pH de 7 y se dejó destapada al medio ambiente. La muestra estuvo totalmente sumergida en la salmuera, representando condiciones más extremas.

Fuente. Elaboración propia.

Figura 11. Prueba # 7 antes de someterlas a prueba.



Fuente. Elaboración propia.

Resultados de biodegradabilidad en los diferentes medios sometidos:

Tabla 17. Pruebas de Biodegradabilidad - Fase final.

Biodegradabilidad en Agua	
Fecha de observación	31 de mayo 2024
Consistencia	Textura gelatinosa
Superficie	Generación de escamas al leve contacto.
Agua del recipiente	Turbia debido a los sedimentos desprendidos de la muestra.
Color de la muestra	Más claro
Biodegradabilidad en tierra	
Fecha de observación	31 de mayo de 2024
Consistencia	Es blanda, pero no tanto como la muestra en agua.
Humedad de la tierra	La tierra presentaba humedad, pero no en exceso.
Color de la muestra	Aparecieron puntos de color naranja y negro, similares a hongos.
Biodegradabilidad en Salmuera	
Color de la muestra	Más oscuro.
Tamaño de la muestra	Absorbió agua, aumentando su tamaño inicial.
Consistencia	Blanda, pero no presentaba encamación.

Fuente. Elaboración propia.

Figura 12. Trozo de prueba 7.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 13. Muestra en salmuera.



Figura 14. Muestra en agua.

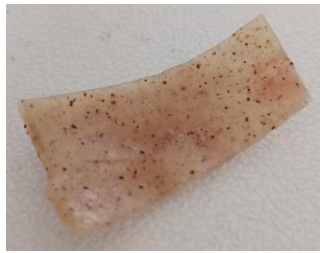


Figura 15. Muestra en tierra.



Densidad de las pruebas número 6, 7 y 8.

Se midieron las densidades de cada una de las muestras utilizando el siguiente procedimiento: se colocó un volumen conocido en una probeta de 250 ml y se cortó un pedazo de cada muestra, se pesó cada uno y se dispuso dentro de la probeta con agua. Luego, se observó el desplazamiento del agua y utilizando la ecuación de densidad se determinó la densidad para cada muestra, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 18. Densidad.

N° prueba	6	7	8
Volumen inicial	100 ml	130 ml	130 ml
Masa de la muestra	9 g	10 g	7 g
Volumen final	108 ml	140 ml	136 ml
Densidad	1.125 g/ml	1.00 g/ml	1.166 g/ml

Fuente. Elaboración propia.

13. ANÁLISIS DE COSTOS.

A continuación, se detalla el costo de producción a escala de laboratorio de las biopelículas. Este análisis contribuirá a asegurar la viabilidad económica y fomentar prácticas sostenibles en la generación de las biopelículas.

Tabla 19. Costo de materias primas.

Materias primas	Cantidad	Costo unitario
PvOH	100g	\$8.500
Glicerina	250ml	\$11.000
Orejero	50 g	\$ 2.500
Agua	3000ml	\$0.985
Sagú	500g	\$5500
Costo total		\$27.500,09

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 20. Costo de mano de obra.

Mano de obra	Costo por hora	Horas trabajadas	Total
Ingeniero 1	\$70.000	18	\$1.260.000
Ingeniero 2	\$70.000	18	\$1.260.000
Ingeniero 3	\$70.000	18	\$1.260.000
Costo total			\$ 3.780.000

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 21. Costo de horas de laboratorio.

Horas de laboratorio	Costo	Horas trabajadas
1	\$345.000¹	24
		Costo total \$8.280.000

Fuente. Elaboración propia.

14. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En los primeros dos ensayos, se observó que la proporción de almidón con respecto al agua era demasiado alta. Esto resultó en películas de biopolímero frágiles y débiles después del proceso de secado en el horno a 60°C durante 24 horas. Es probable que las cantidades de plastificante, como la glicerina, fueran insuficientes para proporcionar la flexibilidad necesaria al material.

La temperatura utilizada en las primeras pruebas fue demasiado alta, lo que provocó una evaporación rápida del agua en la mezcla de almidón. Esta evaporación acelerada puede haber generado tensiones en el material y contribuido a la formación de grietas durante el proceso de secado en el horno.

En los ensayos posteriores (3 y 4), se realizaron ajustes en la formulación del biopolímero. Se redujo la cantidad de almidón y se aumentaron las cantidades de PVOH y glicerina, lo que se esperaba que mejorara la flexibilidad y la resistencia del material. Además, se disminuyó la temperatura del horno a 35°C, manteniendo el mismo tiempo de secado que en los ensayos anteriores.

¹ Este dato del costo de la hora de laboratorio se obtuvo mediante los costos estipulados por el Laboratorio de la universidad EAN.

Sin embargo, surgió un nuevo problema: las películas resultantes tenían un grosor mayor que las anteriores. Esto significaba que el tiempo de secado utilizado previamente ya no era suficiente para eliminar toda la humedad de las películas, lo que resultó en que se agrietaran nuevamente.

En el ensayo # 5, se mantuvo la misma composición y grosor de las películas, pero se decidió aumentar la temperatura del secado a 55°C durante 24 horas. Sin embargo, este cambio tampoco fue suficiente y las películas se agrietaron aún más. Además, se observó que las películas tenían un buen secado en la parte superior, pero en la parte que estaba en contacto con el molde, siempre quedaba algo gelatinosa.

En la muestra número 7, se aumentó la proporción de PvOH en comparación con el agua con el objetivo de reducir el contenido de agua. Se disminuyó la cantidad de orejero a 1.00 gramos. Después de dejarla a 55°C durante 12 horas, se observó una mejora significativa en comparación con muestras anteriores: ya no se presentaban grietas y tenía una consistencia firme y una buena elasticidad. Sin embargo, surgieron dificultades durante el proceso de secado, ya que la parte en contacto con el molde no se secaba de manera uniforme en comparación con la parte superior. Esto llevó a voltear la muestra después de 7 horas de secado, lo que ocasionó que parte de la mezcla, que aún estaba bastante gelatinosa, quedara adherida al molde (molde en silicona, redondo de 23 cm de diámetro).

En el experimento número 8, se reprodujo la muestra obtenida en el ensayo anterior, es decir, la muestra número 7. A pesar de que esta réplica no recibió el tiempo de secado óptimo, logró una uniformidad bastante satisfactoria.

Comparativa entre muestras número 6 7 y 8.

La prueba número 7 exhibió las mejores características. Al tocar el bioplástico de la muestra, se percibe firme pero también con una flexibilidad adecuada. En contraste, la muestra número 8, que fue una réplica de la 7, presenta una flexibilidad aceptable, pero se siente más compacta. Además, el secado en esta muestra no fue uniforme, lo que le confiere una sensación algo gelatinosa. Esta disparidad en el proceso de secado podría haber impactado en la calidad final del producto.

Las muestras #7 y #8, a las que se les incorporó orejero durante el secado, mostraron una reducida propensión a desarrollar grietas en comparación con una muestra elaborada exclusivamente con sagú. Esta última tenía una tendencia significativa a agrietarse fácilmente durante el secado. Estos resultados sugieren que la adición de orejero podría ser beneficiosa para mantener la integridad estructural del bioplástico durante el secado.

Para replicar el ensayo #7, que fue el más exitoso, es crucial identificar el punto exacto en el que ocurre el cambio de viscosidad, ya que este es el momento óptimo para que la plastificación se desarrolle de manera ideal. En todos los ensayos realizados, se alcanzó una temperatura de 60°C para llevar la mezcla al molde. Sin embargo, durante los experimentos se observó que, aunque el termómetro no registraba un cambio en la temperatura, la viscosidad cambiaba en cuestión de segundos.

Al comparar los resultados finales después del secado, se notaron diferencias en las texturas de los plásticos y en la transparencia obtenida, a pesar de haber seguido los mismos estándares de preparación. Esto sugiere que el cambio súbito en la viscosidad, aunque no registrado por el termómetro, influye significativamente en las propiedades finales del material.

La muestra número 6, elaborada solo con sagú, mostró una mayor facilidad para agrietarse durante el secado y se retraía más fácilmente que las otras muestras. Como resultado, el bioplástico obtenido era más grueso, a pesar de haberse hecho en el mismo molde y con las mismas cantidades que las muestras posteriores. Esto indica que el sagú, como único componente, puede no proporcionar la estabilidad estructural necesaria para evitar estos problemas durante el proceso de secado.

En el ensayo 1 de tensión con la muestra #7, se observa que con una longitud inicial de 50 mm y una elongación del 67.56%, la película alcanza una longitud máxima de 83.78 mm. En el ensayo 2, que es una réplica con la misma longitud inicial pero una elongación del 18.48%, la longitud máxima alcanzada es de 59.24 mm. En comparación, el ensayo 3, realizado solo con sagú, muestra una elongación del 14.8%, permitiendo una longitud máxima de 57.4 mm. Estos resultados son prometedores.

15. CONCLUSIONES.

Se concluye que es necesario mantener una buena proporción entre agua y almidón (300 ml:36 g; óptima), ya que, en las primeras muestras, una proporción inadecuada causaba fragilidad y debilidad en la biopelícula. Además, la falta de plastificante, como la glicerina, contribuyó a este problema; por ello, se aumentó su cantidad de 5 ml a 20 ml.

Si se tiene una temperatura elevada ($\approx 60^\circ$) se generan grietas en la película, mientras que si se reduce mucho ($\approx 30^\circ$) se provoca un tiempo de secado insuficiente a 24 h. Por ende, se debe tener un equilibrio entre temperatura y tiempo de secado ($\approx 45^\circ$ a 50°C y 12h) para obtener resultados óptimos.

El aumento en la proporción del PvOH y disminución de orejero mejoraron la resistencia y elasticidad de la biopelícula, pero persistieron problemas en el secado, especialmente en la uniformidad.

Se sintetizó con éxito la composición para la biopelícula, demostrando la viabilidad de utilizar almidón de sagú y residuo de Orejero como materia prima para la producción de bioplásticos.

La caracterización del bioplástico reveló propiedades adecuadas de, tensión y elongación, lo que abre la puerta a futuras investigaciones para explorar el potencial en diversos usos.

Al comparar los resultados con bioplásticos hechos de almidón de sagú, el bioplástico sintetizado en este estudio presenta características competitivas en términos de biodegradabilidad y propiedades mecánicas, posicionándolo como una opción viable para el desarrollo de biomateriales sostenibles.

La muestra #7 de biopelícula hecha a partir de sagú y orejero mostró mayor capacidad de elongación, alcanzando una longitud máxima de 83,78 mm con una elongación del 67,56 % . mm, mientras que la muestra hecha únicamente de sagú muestra una elongación del 14.8% y una longitud máxima de 57.4 mm. Con esto se concluye un rendimiento superior en términos de elongación y capacidad de estiramiento, lo que la hace una opción prometedora para aplicaciones que requieren materiales con alta flexibilidad y resistencia a la tensión.

16. RECOMENDACIONES

Si se quiere llevar a escala de producción, se recomienda continuar con la investigación, buscando mejorar la uniformidad del secado y temperatura. Adicional a esto la evaluación de la

toxicidad y otros aspectos ambientales es crucial para validar la sostenibilidad del bioplástico a largo plazo.

Con las pruebas realizada en la máquina de ensayo universal, se dan unos buenos resultados para continuar la investigación y así finalmente llegar a un uso, se recomienda ajustar mejor la temperatura y tiempo de secado pues con la réplica hecha hubo disminución en la elongación.

Tener en cuenta la ley 2232 de 2022 Art. 34 Par. 1°, que dicta “la rata de biodegradación de los productos plásticos en condiciones ambientales naturales y/o compostaje en condiciones ambientales naturales referidos en el presente artículo deberá ser como mínimo del 50% en tres (3) años, y del 85% en (4) cuatro años, contados a partir de la disposición final del producto en condiciones ambientales naturales” para pruebas de biodegradación con un uso final, como entre otras normas ASTM (618,638, D882, E252, para las propiedades mecánicas).

17. REFERENCIAS.

Akiyama, M., Tsuji, H., Horikoshi, Y., & Matsumoto, K. (2020). Biodegradability of biodegradable plastics in natural environments. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109375. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109375>

American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities (ASTM D6400). <https://www.astm.org/d6400-21.html>.

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638-14). <https://www.astm.org/d0638-14.html>.

Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>

Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835-864.

Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y., & Riera, M. A. (2019). OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE MAÍZ (*Zea mays* L.). *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(1), 1-11.

Barriga, J. A. L., Rueda, H. C., Muñoz, O. D., & Galeano, J. C. R. (2020). Characterization of bioplastics obtained from cassava starch and bocachico fish skin gelatin. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 209-218.

Borém, A., & Filgueiras, H. A. C. (2009). Sistemas de produção de mandioca. *Embrapa Informação Tecnológica*.

Briassoulis, D. (2021). Environmental fate of biodegradable polymers in soils and their biodegradation kinetics under controlled composting conditions. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(1), 53–118. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09556-2>

Calle, Z., Pérez, J., & Díaz, M. (2020). Aprovechamiento del árbol de Orejero (*Enterolobium cyclocarpum*) en la región Caribe colombiana. *Revista Corpoica*, 18(1), 101-112. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/issue/archive>

Celulosa—Concepto, historia, función, usos y propiedades. (2024). <https://concepto.de/>. Recuperado 29 de marzo de 2024, de <https://concepto.de/celulosa/>

Chariguamán J.A. (2015). Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.). Escuela Agrícola Panamericana. Recuperado a partir de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4560/1/AGI-2015-014.pdf>

Collí Pacheco, J. P. (2018). Estudio del efecto del contenido y tamaño de partículas de la testa de la semilla del fruto de pich (*Enterolobium cyclocarpum*) sobre las propiedades de un almidón termoplástico a base de dicho fruto [Tesis de maestría, CICY]. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1190>

Corpoica. (2019). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(2), 1-14. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2040/3805>

De las proteínas a los plásticos que cambian de forma. (2024). CORDIS | European Commission. Recuperado 29 de marzo de 2024, de <https://cordis.europa.eu/article/id/442336-from-proteins-to-shape-changing-plastics/es>

Delgado, C. M., Mutis, G. C., & Noguera, L. J. C. G. (2022). De la economía lineal a la economía circular, transformaciones en el manejo de los residuos sólidos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 52-82.

Dewi, R., Sylvia, N., & Zulnazri, Z. (2022). The Effect of Radiation Technology on Surface Morphology of Sago Based Eco-friendly Plastic. *Proceedings of Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)*, 3, 00003–00003. <https://doi.org/10.29103/micoms.v3i.41>

Díaz, M. J. P., Varela, A. P. S., Rodríguez, L. F., Rúales, E. F., Jiménez, P. A., & Perea, H. G. (2018). Caracterización fisicoquímica de la harina de corteza de banano en tres estados de maduración. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(4), 1-10.

Dunn, J. (2018). The origin of plastics. *American Scientist*, 106(2), 104–111.
<https://doi.org/10.1511/2018.129.104>

Enciclopedia Británica. (2024). Celulosa . Académico Británico. Recuperado el 29 de marzo de 2024 de <https://academic-eb-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/levels/collegiate/article/cellulose/22028>

Enciclopedia Británica. (2024). Pectina . Académico Británico. Recuperado el 29 de marzo de 2024 de <https://academic-eb-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/levels/collegiate/article/pectin/58914>

Enciclopedia Británica. (2024). Proteína . Académico Británico. Recuperado el 29 de marzo de 2024 de <https://academic-eb-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/levels/collegiate/article/protein/110575>

European Bioplastics. (2022, octubre). What are bioplastics? European Bioplastics e.V.
<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>

Falla, J. L., & Novoa, H. Y. R. (s. f.). (2018). ALMIDÓN DE SAGÚ (CANNA EDULIS KER), PRODUCTO COLOMBIANO CON POTENCIAL DE COMERCIALIZACIÓN INTERNACIONAL.

García, R., De Wever, H., & Van Der Bruggen, B. (2020). Bioplastics from renewable resources: Physicochemical and thermal properties of wheat gluten–based bioplastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(4), 48471.

García-López, B., Velasco-Santos, C., Ortega-Gudino, P., & Castaño, V. M. (2012). Mechanical and thermal properties of thermoplastic starch reinforced with natural fibers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 107(2), 689-697.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.

Godínez Cardoso, M. F., Juárez Green, S., Nieto Trespalacios, R. A., & Senties Paz, M. (2016). *BIOPLÁSTICOS: SOLUCIONES AMBIENTALES*. 17.

González Álvarez, D. O. (2013). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de alimentos funcionales: Una aproximación desde la nutrición animal [Corporación Universitaria Lasallista]. http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1032/1/Aprovechamiento_residuos_agroindustriales_producci%C3%B3n_alimentos_funcionales.pdf

Granados C, C., Guzman C, L. E., Acevedo C, D., Díaz M, M., & Herrera A, A. (2014). PROPIEDADES FUNCIONALES DEL ALMIDON DE SAGU (*Maranta arundinacea*). 12(2), 90–96.

Guo, M., Zhang, J., & Li, L. (2021). Starch modification and its application in bioplastics: A review. *Carbohydrate Polymers*, 261, 117876.

Hernández B, J. E., Medina V, O. J., Hernández B, A. L., & Cocha V, P. M. (2017). Oxidación y caracterización fisicoquímica de almidón de sagú “*Marantha Arundinacea*” para la elaboración de bioplástico. *Fuentes, el reventón energético*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.18273/revfue.v15n1-2017002>

Higuera, C., Rodríguez, N., Zuluaga, K. (2019). Recuperado 1 de marzo de 2024, de <https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/10904/HigueraCamilo2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Iglesia González, G. (2020). De la economía lineal a la circular: La logística inversa y la sostenibilidad de la cadena de suministro como elementos fundamentales del cambio. Universidad Zaragoza.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). Acondicionamiento de plásticos para ensayo (NTC 718). <https://tienda.icontec.org/gp-acondicionamiento-de-plasticos-para-ensayo-ntc718-2020.html>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). Plásticos. Método de ensayo para determinar las propiedades de tracción de láminas plásticas delgadas. (NTC 942). <https://tienda.icontec.org/gp-plasticos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-propiedades-de-traccion-de-laminas-plasticas-delgadas-ntc942-2020.html>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2024). Método de ensayo para determinar las propiedades de tracción en plásticos (NTC 595). <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-propiedades-de-traccion-en-plasticos-ntc595-2024.html>.

International Organization for Standardization. (2012). Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado. Parte 1: Método general. (ISO 14855-1). <https://www.iso.org/standard/57902.html>

International Organization for Standardization. (2019). Biobased content Part 2: Determination of biobased carbon content. (ISO 16620-2). <https://www.iso.org/standard/72474.html>

International Organization for Standardization. (2019). Determination of tensile properties

International Organization for Standardization. (2021). Organic recycling

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.

Jones, B., & García, C. (2020). Producción sostenible de biopelículas. Editorial Y.

Koller, M., Marsalek, L., Braunegg, G., & Rodrigues, A. (2017). Producing microbial polyhydroxyalkanoate (PHA) biopolyesters in a sustainable manner. *New Biotechnology*, 37, Part A, 24-38.

Kumar, A., Sharma, S., & Singh, N. P. (2019). Sustainable biodegradable packaging materials for food applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3), 1265–1293.

Kumar, S., Krishnan, S., Mohanan, A., & Rao, K. (2021). Bioplastics: A sustainable alternative to plastics. In S. D. Kumar, S. Sehgal, & S. K. Singh (Eds.), *Bioplastics and Their Challenges* (pp. 1-26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6480-6_1

León-Méndez, G., León-Méndez, D., Monroy-Arellano, M. R., Espriella-Angarita, S., & Herrera-Barros, A. (2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética. 7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4263365>

Ley 2232 de 2022 (Colombia), artículo 10, párrafo 1. (7 de julio de 2022).

Ley 2232 de 2022 (Colombia), artículo 34, párrafo 1. (7 de julio de 2022).

Li, X., Zhang, W., & Gu, G. (2018). Biodegradable Starch-Based Plastics. In M. Misra, A. K. Mohanty, & L. T. Drzal (Eds.), *Renewable Resources and Biodegradable Polymers: Processing, Properties, and Applications* (pp. 383-409). Elsevier.

Lobo-Arias, M., Medina-Cano, C. I., Grisales-Arias, J. D., Yepes-Agudelo, A. F., & Álvarez-Guzmán, J. A. (2017). Caracterización y evaluación morfológicas de la colección colombiana de achira, *Canna edulis* Ker Gawl. (Cannaceae). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 47-73.

Mali, S., Grossmann, M. V. E., Garcia, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2002). Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydrate Polymers*, 50(4), 379–386. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00058-9)

Martínez, A. N., & Porcelli, A. M. (2018). Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte). *Lex: Revista de la Facultad de Derecho y Ciencia Política de la Universidad Alas Peruanas*, 16(22), 301-334.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2020). Informe de gestión ambiental 2019.

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Informe_de_Gestion_Ambiental_2019.pdf

Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276-277(1), 1-24.

OECD. (2023, February 2). Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. <https://www.oecd.org/environment/plastics/>

ONU-Habitat. (2022). Ya somos 8 mil millones de personas. [Onuhabitat.org.mx. https://onuhabitat.org.mx/index.php/ya-somos-8-mil-millones-de-personas](https://onuhabitat.org.mx/index.php/ya-somos-8-mil-millones-de-personas)

Ortega, M. P., Hernández, J. G., Guzmán, F. M., Lizarazo, L. P., & Rodríguez, E. R. (2020). Impacto de la agricultura en el desarrollo económico de las regiones rurales de Colombia. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 34(2), 145-160.

Pacheco, J. P. C. (2018). Estudio del efecto del contenido y tamaño de partículas de la testa de la semilla del fruto de pich (*Enterolobium Cyclocarpum*) sobre las propiedades de un almidón termoplástico a base de dicho fruto.

Pandey, J. K., Ahn, S. H., Lee, C. S., & Mohanty, A. K. (2011). Sustainable biodegradable nanocomposites: Emerging trends and future outlook. *Trends in Biotechnology*, 29(7), 394-403.

Papong, S., Zhang, Y., Thakhiew, W., Ujjin, S., & Arthanareeswaran, G. (2021). From petrochemical to biodegradable plastics: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124248>

Part 1: General principles (ISO 527-1). <https://www.iso.org/standard/75824.html>

Peñaranda Gonzalez, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *RIAA*, 8(2), 141-150.

Plastics Europe. (2023, January 19). *Plastics – the Facts 2022*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). *Economía Circular*.

Reddy, N., & Yang, Y. (2009). Biodegradable polymers from renewable resources: A critical review. *Polymer Reviews*, 49(4), 334-377.

Roa, L. (2016). Caracterización clínica y anatomopatológica de la intoxicación por *Enterolobium cyclocarpum* en el ganado bovino en los Llanos Orientales de Colombia [UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58701/79661083.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3, 3263.

Rojas Marco, Rodríguez Adriana, Brito Lorenzo; (2020). Producción de láminas de plástico biodegradables a partir del almidón de arracacia xanthorrhiza. *Riobamba*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7504271> Dialnet-ProduccionDeLaminasDePlasticoBiodegradablesAPartir-7504271.pdf

Serratos Arévalo, J. C., Carreón Amaya, J., Castañeda Vázquez, H., Garzón De la Mora, P., & García Estrada, J. (2008). Composición químico-nutricional y de factores antinutricionales en semillas de parota (*enterolobium cyclocarpum*). *Interciencia*, 33(11), 850-854.

Sessini, V., & Peponi, L. (2017). Las diferentes caras del exilio. *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, 113(723): 1-10. Recuperado a partir de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6038279>

Silva, R., Ortega-Toro, R., Martins, J., Velasco, D., & Amaro, H. M. (2020). Bioplastics as alternative packaging materials for food applications: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6989.

Smith, A. (2019). *Avances en bioplásticos*. Editorial X.

Specifications for compostable plastics. (ISO 17088).
<https://www.iso.org/standard/74994.html>

Steinbüchel, A., & Valentin, H. E. (Eds.). (2013). *Biopolymers: New materials for sustainable films and coatings*. John Wiley & Sons.

Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153-2166.

Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 14(1). <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>

Yaruro Cáseres, N. C. (2018). EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, TÉRMICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL ALMIDÓN DE ACHIRA (*Canna edulis*) [UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA].

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69533/1143232250.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>