

**EVALUACIÓN DE LA FIBRA DE GUADUA Y MUCILAGO DE NOPAL PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO CON BASE A LA NTC 595 DE 2024 EN LA CIUDAD
DE VALLEDUPAR**

AUTOR (ES):

LINA MARCELA MEJÍA DURAN

YAIRETH ANDREA MÉNDEZ JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR - CESAR

2026-1

**EVALUACIÓN DE LA FIBRA DE GUADUA Y MUCILAGO DE NOPAL PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO CON BASE A LA NTC 595 DE 2024 EN LA CIUDAD
DE VALLEDUPAR**

AUTOR (ES):

LINA MARCELA MEJÍA DURAN

YAIRETH ANDREA MÉNDEZ JIMÉNEZ

DIRECTOR:

PhD KARINA PAOLA TORRES CERVERA

CODIRECTOR:

JULIO VEGAS SUAREZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR - CESAR

2026-1

DEDICATORIA

Con todo mi cariño dedico este proyecto a todas las personas que, con su apoyo y confianza hicieron posible la culminación de esta meta académica; en especial a mi madre Luz Marina, por su apoyo incondicional y por enseñarme a nunca rendirme. A mi padre Jairo Mejía por su apoyo constante, sus consejos y sus ejemplos de fortaleza. A mi hermana Lupe Mejía por su alegría, compañía y palabras de ánimo en cada momento.

A mi pareja Nilson Borja, por su paciencia, comprensión y amor, estando a mi lado en los momentos más difíciles celebrando conmigo cada avance, dedico este proyecto a toda mi familia que, con su ayuda, confianza creyeron en mí y hoy gracias a ellos pude materializar este sueño.

Culmino esta etapa con la satisfacción de haber alcanzado una meta que solo DIOS hizo posible que alguna vez fue solo un sueño, que con esfuerzo, dedicación y fe todo objetivo puede hacerse realidad. LINA MEJIA DURAN

Primeramente, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y el centro de todo lo que soy.

A mis padres, Yaléidys Jiménez y Roosber Méndez, por ser el pilar más importante en mi camino. Por confiar siempre en mí, por apoyarme sin condiciones y por sacrificarse en silencio para que hoy pueda cumplir esta meta.

Y con un amor que trasciende el tiempo y la distancia, dedico este logro a Lucía Sarabia y Diofanor Jiménez, dos seres que ya no me acompañan físicamente, pero que permanecen en mi corazón. Su recuerdo y sus enseñanzas siguen siendo mi inspiración diaria. Sé que, desde el cielo, celebran conmigo este gran paso

A ustedes, gracias por ser parte esencial de mi historia. Este triunfo es tan suyo como mío.

YAIRETH MENDEZ JIMENEZ

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero darle las gracias a dios por cumplir mis deseo ser mi guía constante en medio de este camino por darme la fuerza, fortaleza, sabiduría y la paciencia necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis familiares por el amor brindado, apoyo, comprensión en cada momento de este proceso gracias por ser la inspiración y mi mayor motivación para seguir cumpliendo mis objetivos.

Gracias a mi compañera yaireth Méndez que con mucha dedicación, compromiso y compañerismo a lo largo de esta formación fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Por ultimo agradecerle a la directora de este proyecto ingeniera Karina torres, por su valiosa orientación, sus consejos y el tiempo brindado durante todo el proceso investigativo. Su guía académica fue clave para la culminación exitosa de este trabajo.

A todos ustedes gracias por ser parte de este sueño hecho realidad. LINA MEJIA
DURAN

Principalmente, a Dios, por ser mi guía constante, mi compañía y mi sostén en cada momento de este proceso. Cada logro alcanzado es reflejo de tu amor infinito y de las bendiciones que has derramado sobre mí.

A mis padres y a mi hermano, quienes han sido mi mayor fuente de motivación e inspiración. Gracias por su amor incondicional, por su apoyo constante y por enseñarme, con su ejemplo, que la perseverancia, la humildad y el esfuerzo son las bases del éxito. Todo lo que soy se lo debo a ustedes; este logro no es solo mío, sino de todos, porque cada paso que doy lleva impreso su amor, sus sacrificios y su confianza en mí.

A mi compañero de vida, Luis Aguilar, por ser mi apoyo inquebrantable en los momentos difíciles. Tu compañía ha sido un regalo invaluable durante este proceso.

A mi tía Sandri Navarro, por su cariño, por creer en mí desde el primer momento y por brindarme su apoyo incondicional en todo lo que estuvo a su alcance. Gracias por tus palabras de aliento, tus consejos y tu presencia constante, que fueron fundamentales para cumplir esta meta.

A mi compañera de tesis, Lina Mejía, por su empatía, compromiso y excelente compañerismo. Gracias por compartir conmigo este camino de aprendizaje, por tu disposición y por hacer de este proceso una experiencia más llevadera y enriquecedora.

A la ingeniera Karina Torres, por su dedicación, orientación y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo. Gracias por su paciencia, por transmitirnos sus

conocimientos y por estar siempre dispuesta a guiarnos con amabilidad y profesionalismo.

YAIRETH MENDEZ JIMENEZ

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su tiempo, consejo o palabra de aliento, mi más sincero agradecimiento. Cada gesto, por pequeño que haya sido, contribuyó a que hoy este sueño sea una realidad.

RESUMEN

El presente estudio evaluó la viabilidad técnica, ambiental y económica de bioplásticos elaborados a partir de fibra de guadua y mucílago de nopal mediante un diseño factorial 2×2 , considerando como factores el tipo de residuo y la temperatura de procesamiento. Se realizaron ensayos de densidad, resistencia mecánica bajo carga estática y biodegradabilidad en agua y suelo, además de comparaciones con plásticos convencionales y biopolímeros comerciales.

Los resultados indicaron que el bioplástico de fibra de guadua procesado a 120 °C presentó el mejor desempeño global, al lograr un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, cohesión estructural y estabilidad térmica. En los ensayos de biodegradabilidad, esta formulación registró pérdidas de masa entre 15–22 % en agua y 21–28 % en suelo húmedo durante tres días, evidenciando una degradación progresiva y controlada, compatible con aplicaciones de mediana duración.

En contraste, el bioplástico de mucílago de nopal mostró una degradación más acelerada, con pérdidas de masa entre 28–36 % en agua y 25–32 % en suelo. Este comportamiento se asocia con la naturaleza hidrofílica de sus polisacáridos, que incrementa la absorción de humedad y la susceptibilidad a la hidrólisis y al ataque microbiano. Aunque esta característica favorece su rápida descomposición ambiental, limita su durabilidad estructural. En consecuencia, se sugiere que futuras investigaciones orienten sus esfuerzos hacia el desarrollo de formulaciones híbridas que integren componentes lignocelulósicos y polisacáridicos en proporciones optimizadas, con el fin de combinar resistencia estructural y degradación controlada.

Palabras claves: Biosólidos, biodegradabilidad, plásticos convencionales.



ABSTRACT

This study evaluated the technical, environmental, and economic viability of bioplastics made from guadua fiber and nopal mucilage using a 2×2 factorial design, considering the type of waste and processing temperature as factors. Density, mechanical strength under static load, and biodegradability tests in water and soil were performed, along with comparisons to conventional plastics and commercial biopolymers.

The results indicated that the guadua fiber bioplastic processed at 120 °C exhibited the best overall performance, achieving a suitable balance between mechanical strength, structural cohesion, and thermal stability. In the biodegradability tests, this formulation registered mass losses of 15–22% in water and 21–28% in moist soil over three days, demonstrating progressive and controlled degradation, compatible with medium-term applications.

In contrast, the nopal mucilage bioplastic showed more accelerated degradation, with mass losses between 28–36% in water and 25–32% in soil. This behavior is associated with the hydrophilic nature of its polysaccharides, which increases moisture absorption and susceptibility to hydrolysis and microbial attack. Although this characteristic favors its rapid environmental decomposition, it limits its structural durability. Consequently, it is suggested that future research focus on developing hybrid formulations that integrate lignocellulosic and polysaccharide components in optimized proportions, in order to combine structural strength with controlled degradation.

Keywords: Biosolids, biodegradability, conventional plastics.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
4 MARCO DE REFERENCIA.....	21
4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
4.2 MARCO TEÓRICO.....	26
4.3 MARCO CONCEPTUAL	31
4.5 MARCO LEGAL.....	31
5. MARCO METODOLÓGICO	40
5.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN	40
5.5. MUESTREO POBLACIONAL	41
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	55

7. CONCLUSIONES	99
8. RECOMENDACIONES	82
9. BIBLIOGRAFÍA	83



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Almidón de Nopal	29
Figura 2. Ubicación del municipio de Valledupar	30
Figura 3. Extracción del mucilago de nogal	33
Figura 4. Obtención de fibra de guadua	34
Figura 5. Procedimiento	37
Figura 6. Proceso de obtención del bioplástico	39
Figura 7. Procedimiento	10
Figura 8. Tracción y elongación del bioplástico	12
Figura 9. Biodegradabilidad en agua.....	49
Figura 10. Viabilidad ambiental	15
Figura 11. Fibras no adecuadas	61
Figura 12. Láminas de bioplásticos finales	63
Figura 13. Determinación de la densidad	64
Figura 14. Pérdida de peso en biodegradabilidad en agua.....	13
Figura 15. Pérdida de masa en biodegradabilidad en suelo	15
Figura 16. Impacto ambiental de bioplásticos.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad aplicable al proyecto	21
Tabla 2. Caracterización física	25
Tabla 3. Revisión documental	19
Tabla 4. Características de la materia prima según la revisión	21
Tabla 5. Extracción del mucilago de nogal	58
Tabla 6. Proceso de extracción de la pulpa y la fibra de guadua	59
Tabla 7. Resultados de la caracterización	64
Tabla 8. Establecimiento de las dosis óptimas	67
Tabla 9. Mezcla de proporciones.....	69
Tabla 10. Densidades de los bioplásticos.....	75
Tabla 11. Resultados de resistencia a la tracción.....	79
Tabla 12. Resultados de biodegradabilidad en agua	711
Tabla 13. Resultados de biodegradabilidad en suelo.....	15
Tabla 14. Viabilidad técnica.....	82
Tabla 15. Resultados del diseño experimental	85
Tabla 16. Análisis económico de los bioplásticos	99
Tabla 17. Cálculo del TIR	911

INTRODUCCIÓN

Cada año millones de toneladas de plástico a nivel mundial terminan en el océano, afectando el ecosistema y los animales que habitan en este entorno. Buscando lograr un cambio significativo para el ecosistema, algunas empresas u organizaciones se han sumado a buscar las mejores estrategias para darle un uso adicional a dichos desperdicios que genera este material, generando una transformación en productos que resuelvan problemáticas distintas para reducir y aprovechar la contaminación dándoles un nuevo sentido de uso (Oróstegui, 2022). En algunos casos, estos diseños son hechos para dar sustento a personas de recursos limitados, lo genera un sentido aún más grande en la propuesta de dicha transformación (Prieto, 2021).

Esta problemática ha llevado también, a la expansión de nuevas investigaciones para la fabricación de un sustituto de los plásticos sintéticos como el PET, dirigido a la generación de materia prima con principio renovable como lo son los bioplásticos PHA, uno de estos materiales son los recursos amiláceos, pues están compuestos por estructuras semi cristalinas que les concede propiedades fisicoquímicas y atributos funcionales atractivas para la aplicación en plásticos. Teniendo en cuenta que su principal beneficio es el proceso de degradación más acelerado que el plástico tradicional, asimismo, su aprovechamiento en caso de llegar al océano sería como alimento de especies marinas pues su composición permite ser ingerida aparentemente sin efectos contradictorios a la salud de estos animales (Miranda, 2022).

Dado lo anterior, el gobierno colombiano destaca la importancia de esta ley 2232 de 2022, la cual radica en su enfoque en la protección del medio ambiente y la salud

pública, ya que busca disminuir la cantidad de plásticos de un solo uso y fomentar la innovación en la producción de bioplásticos. En relación con la producción de bioplásticos, la norma ofrece un impulso significativo, ya que promueve la investigación y el desarrollo de tecnologías sostenibles para la producción de bioplásticos a partir de fuentes renovables, como la biomasa y los residuos orgánicos.

Por medio de la investigación se evaluó la fibra de guadua y mucilago de nopal para la obtención de bioplástico con base al ntc 3576:2014 en la ciudad de Valledupar. Desde el punto de vista ambiental, mediante la producción de bioplásticos ofreció una alternativa sostenible a los plásticos tradicionales, que son derivados del petróleo y contribuyen significativamente a la contaminación del medio ambiente y el cambio climático. Además, al utilizar materiales renovables y biodegradables como el nogal y la guadua, se reduce la dependencia de los recursos fósiles y se minimiza el impacto negativo en el medio ambiente.

La investigación se estructura en nueve capítulos:

Capítulo 1. Planteamiento del problema

Capítulo 2. Justificación de investigación

Capítulo 3. Objetivos de la investigación, incluye objetivo general y específicos.

Capítulo 4. Marco referencial del estudio

Capítulo 5. Marco metodológico.

Capítulo 6. Resultados

Capítulo 7. Conclusiones

Capítulo 8. Recomendaciones

Capítulo 9. Bibliografía



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la ONU, se estima que 12 millones de Kg de plástico a nivel mundial estarían avanzando en la superficie del mar y otros kilogramos de plástico sobre la superficie de la tierra, durante su proceso de degradación; afectando de esta forma la salud de los océanos y los diferentes ecosistemas existentes en él, de igual forma en la superficie terrestre; esto afectando la salud de los humanos, pues logran llegar a la cadena alimenticia por medio de la pesca de animales que en su organismo ya tienen estos desperdicios en su sistema. Según la misma organización el ritmo con que llegan los plásticos no biodegradables al mar y otras superficies como ríos, es de 200 kg por segundo; se estima que, en los próximos años se tendrían problemáticas de salud, tanto para los animales marítimos como en los seres humanos, por acumulación de plásticos y nano plásticos en los organismos (Schmidt Koch, 2019).

Enfocando en Colombia según la revista Semana (2021) informa que por cada persona se consumen aproximadamente 24 kilos de productos de este material, del cual, tan solo se recicla el 20% de los desechos producidos; colocando al país según informa el artículo como la nación que contribuye a la contaminación, estando por encima incluso de países como México y Estados Unidos; colocando alertas en el país y tomando acciones para minimizar el consumo desmedido.

En Valledupar, la falta de conciencia ambiental y la creciente demanda de productos de conveniencia han llevado a un aumento significativo en el consumo de plásticos. La producción y el uso de plásticos de un solo uso, como bolsas, botellas y envases, se han convertido en una práctica común en la vida diaria de los habitantes de la región. A

medida que la población crece y la economía se desarrolla, el consumo de plásticos sigue aumentando, lo que ha generado un impacto negativo en el medio ambiente (Casas, 2021). La falta de educación y conciencia sobre los efectos perjudiciales de los plásticos en el medio ambiente y la salud humana ha llevado a una cultura de desecho y contaminación, que, si no se aborda de manera efectiva, puede tener graves consecuencias para el futuro de la región (Caballero, 2019).

Como consecuencia se plantea la siguiente pregunta problema:

¿Cuál es la eficiencia de producción de bioplástico a partir de mucilago de nogal y guadua?



2. JUSTIFICACIÓN

El gobierno colombiano frente a la problemática de producción y consumo de plásticos en el país radica la ley 2232 de 2022, la cual busca establecer medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso. La normativa en mención es una legislación pionera en Colombia que busca reducir la contaminación plástica y fomentar la producción de bioplásticos sostenibles, estableciendo un marco regulatorio para la gestión de residuos plásticos y promueve la utilización de materiales biodegradables y reciclables en la producción de polímeros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Los bioplásticos son una alternativa sostenible y ecológica a los plásticos tradicionales, ya que están hechos a partir de fuentes renovables como la biomasa, los residuos orgánicos y los recursos biológicos (Miranda, 2022). Su importancia radica en que son biodegradables, es decir, pueden ser descompuestos por microorganismos en un proceso natural, reduciendo así la contaminación del medio ambiente y los océanos. Además, tienen una huella de carbono significativamente menor que los plásticos tradicionales, lo que los hace una opción más sostenible para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. También ofrecen una oportunidad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar la economía circular, ya que pueden ser producidos a partir de residuos que de otra manera serían desechados (Prieto, 2021).

El nogal y la guadua son materiales renovables y sostenibles que ofrecen una serie de cualidades únicas que los hacen ideales para la producción de bioplásticos. El nogal, por ejemplo, es una fuente rica en aceites y compuestos fenólicos que pueden ser

utilizados como plastificantes y antioxidantes en la producción de bioplásticos (Gebresamuel, 2019). Además, su alto contenido de lignina lo hace ideal para la creación de bioplásticos rígidos y resistentes. Por otro lado, la guadua es una planta gramínea que crece rápidamente y es altamente renovable, lo que la hace ideal para la producción de bioplásticos a gran escala. Su alto contenido de celulosa y hemicelulosa la hace perfecta para la creación de bioplásticos biodegradables y compostable. Además, la guadua es una planta que requiere pocos insumos y cuidados, lo que la hace una opción sostenible y ecológica (Montealegre, 2018).

Por medio de la investigación se obtuvo bioplástico a partir de residuos de guadua y nopal basado en los lineamientos de la norma NTC 595 de 2024 en la ciudad de Valledupar, Cesar. La producción de bioplásticos a partir de nopal y guadua tiene una importancia significativa en varios ámbitos, tanto ambiental, científico, social y académico. Desde el punto de vista ambiental, mediante la producción de bioplásticos se ofreció una alternativa sostenible a los plásticos tradicionales, que son derivados del petróleo y contribuyen significativamente a la contaminación del medio ambiente y el cambio climático. Además, al utilizar materiales renovables y biodegradables como el nopal y la guadua, se reduce la dependencia de los recursos fósiles y se minimiza el impacto negativo en el medio ambiente.

Desde el punto de vista científico, la producción de bioplásticos a partir de nopal y guadua representa un avance significativo en el campo de la ciencia de materiales y la ingeniería. La investigación y el desarrollo de tecnologías para producir bioplásticos a

partir de estos materiales renovables puede conducir a nuevos descubrimientos y avances en la comprensión de las propiedades y aplicaciones de los bioplásticos.

En cuanto a la comunidad local, la producción de bioplásticos a partir de nogal y guadua puede tener un impacto positivo en el desarrollo económico y social de la región. La creación de empleos y la generación de ingresos pueden contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y fomentar el desarrollo sostenible de la comunidad.

Finalmente, desde el punto de vista académico, la producción de bioplásticos a partir de nogal y guadua ofrece un campo de estudio innovador y aplicado en ciencias de materiales, ingeniería y sostenibilidad. La investigación en este campo pudo conducir a nuevos conocimientos y avances en la comprensión de los bioplásticos y su aplicación en diferentes industrias. Además, se fomentó la colaboración interdisciplinaria y la formación de profesionales capacitados en el desarrollo de tecnologías sostenibles.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la fibra de guadua y mucílago de nopal para la obtención de bioplástico con base al NTC 595 de 2024 en la ciudad de Valledupar

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las cantidades adecuadas para la elaboración de bioplástico a partir fibra de guadua y mucilago de nopal.
- Identificar mediante ensayos de densidad, biodegradabilidad y resistencia a la tracción, las características físico-mecánicas del bioplástico siguiendo los lineamientos de la norma NTC 595 de 2024
- Valorar mediante ensayos ambientales, técnicos y económicos, la viabilidad del bioplástico a partir de fibra de guadua y mucilago de nopal.



4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Salazar, et. Al, (2022), desarrollaron la investigación: Obtención de películas bioplásticas a partir del mucílago del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) proveniente de la estación experimental Tunshi, Chimborazo, en la escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). El propósito de la investigación fue obtener películas bioplásticas a partir del uso del mucílago del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) proveniente de la estación experimental Tunshi, en la provincia de Chimborazo. Se seleccionó la vía húmeda para la obtención del mucílago debido al rendimiento (75%) que ofrece dicho medio de extracción. Para la obtención de las biopelículas se usó 6 formulaciones basadas en la metodología “Gel casting” establecida por (Pascoe 2019), que involucra el uso del mucílago de nopal como componente principal además de 3 aditivos que permiten mejorar el comportamiento plástico de nuestro polímero natural. Una vez realizada la caracterización físico-mecánica de las biopelículas se pudo determinar que la formulación 4 nos ofrece óptimos resultados, que en el caso de su repetición 2 alcanza una resistencia a la ruptura de 17 N, además de una resistencia a la tensión de 3,24 N/cm². Se pudo conocer que las muestras colocadas en agua tienen un tiempo menor de degradación a comparación de las muestras colocadas en suelo y ambiente. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

Pazmiño (2021), desarrolló la tesis obtención de bioplástico a partir del mucílago de cactus (*Opuntia ficus-indica*) para uso como envolturas alimenticias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Este trabajo de investigación tuvo como objetivo la

elaboración de un bioplástico a partir del mucílago de las pencas del cactus opuntia ficus indica para la utilización como envoltura de alimentos, iniciando con la caracterización físico química y microbiológica de la materia prima, posteriormente se procedió con la extracción del mucílago, mediante la guía descrita por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en base al diseño experimental 2k (con dos variables la velocidad y el tiempo, obteniendo 6 tratamientos con 4 repeticiones cada una), para lo cual, se utilizó 500 ml de agua para cada muestra, con el fin de determinar el mejor rendimiento, luego se realizó el análisis proximal en base la norma INEN 1456, NTE INEN 0401, y el método Kjeldahl y Erlenmeyer. A continuación, se procedió a la obtención de los bioplásticos utilizando cuatro tratamientos, cada uno de ellos se utilizó concentraciones variadas de mucílago (73.53% y 74.01%) y una proteína (11.76% y 12.01%), con concentraciones constantes de vinagre, glicerina, para iguales temperatura y tiempo. El bioplástico más optimo es el T3, ya que presento las mejores características fisicoquímicas y microbiológicas, un espesor del 0.17 mm, un porcentaje de humedad de 28.94%, una solubilidad de 47,16 %, una permeabilidad de 0,0316 g/h.m. MPa, con un porcentaje de elongación 65.00%, con una carga máxima de 5.30 N, la biodegradación de los bioplásticos se realizó en tres medios diferentes; (agua, tierra, ambiente). En agua se descomponen 24 días, en tierra 20 días y al ambiente se descomponen en 34 días. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

Cueva (2019), realizó el estudio: Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón de bambú (*Guadua angustifolia*) y Cynodon Dactylon. El presente trabajo de

investigación cuyo título es “Elaboración de plásticos biodegradables a partir de almidón de bambú (*Guadua angustifolia*) y celulosa de césped (*Cynodon dactylon*), 2019” tiene como objetivo general la obtención de plástico biodegradable a partir de bambú y celulosa de césped a escala de laboratorio. El tipo de investigación a realizar es de enfoque cuantitativo y aplicado. Asimismo, se tomó como población al almidón de bambú obtenido del valle de cañete y los residuos de césped de la avenida los dominicos 501 con cruce con la avenida El olivar, provincia constitucional del Callao, donde se utilizó como muestra aproximadamente 10 kg de bambú y 1 kg de podado de césped. Los resultados obtenidos respecto a las propiedades físico-mecánicas del plástico obtenido, fueron de un esfuerzo máximo de 4.403 MPa aplicando una dosis de 120g de celulosa de césped y 2.3397 MPa aplicando una dosis de 120g de almidón de bambú. De igual modo, en las pruebas de elongación se obtuvo 18.8% aplicando una dosis de 120g de celulosa de césped y 18.03% aplicando una dosis de 120g de almidón de bambú. De igual modo, también se obtuvo una biodegradabilidad máxima de 13.98% en el plástico de almidón de bambú y una biodegradabilidad máxima de 14.65% en el plástico de celulosa de césped, para esta prueba se tomaron plásticos biodegradables de áreas de 4 cm² y 2mm de espesor, los cuales se mantuvieron por tiempo de 14 días bajo condición de exposición de agua salada. En conclusión, se obtuvo plástico biodegradable, donde se manifiesta que el almidón de bambú (*Guadua angustifolia*) y celulosa de césped (*Cynodon dactylon*) pueden ser utilizados como componente esencial para la elaboración de plástico, siendo un material alternativo a los plásticos convencionales que generalmente son hechos de

los derivados del petróleo. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

Rodríguez, et. Al, (2019), elaboraron la investigación Mucilago de nopal y su aplicación en la obtención de biopolímeros en la Universidad de Guanajuato. La investigación se centró en la extracción del mucílago de los cladidos o pencas de nopal de las especies *OPUNTIA Ficus Indica* y *OPUNTIA Tehuacana* con el objetivo de obtener los mayores rendimientos, siendo de $0.472 \pm 0.01\%$ y $0.949 \pm 0.01\%$ respectivamente; a la par se realizaron pruebas de caracterización con el producto obtenido tales como solubilidad, adhesividad, resistencia, pH y determinación de peso molecular por viscosimetría capilar y la ecuación de Mark-Houwink. Se elaboraron películas de biopolímero a base del mucílago obtenido, glicerol y agua variando la concentración de glicerol. En México, se presenta el mayor endemismo para las especies de nopal u *Opuntia* no se han aprovechado de la forma más apropiada los residuos de nopal por lo cual se debe prestar atención en esta problemática y además encontrar métodos de extracción con mayor viabilidad y rendimiento para la obtención del mucílago del nopal colaborando de esta manera a centrar las futuras investigaciones en la elaboración de películas de biopolímero con propiedades confiables a los polímeros sintéticos. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

Miranda (2019), realizó la investigación: Estudio de las concentraciones de mucilago de nopal (*opuntia ficus -indica*) para elaboración de biopolímeros degradables. esta investigación tiene por objetivo analizar las concentraciones óptimas de mucilago de nopal (*Opuntia Ficus Indica*) en la elaboración de biopolímeros degradables mediante

revisiones bibliográficas. Los estudios han demostrado que la una concentración menor de 5 gr de mucílago de nopal el bioplástico presentará condiciones más favorables frente a las pruebas físicas y mecánicas a realizarse, además que a esa concentración del insumo se acorta el tiempo de degradación ambiental de la película. Los biopolímeros elaborados con concentraciones mayores a 20 gramos de mucilago de nopal presentan menor porcentaje de permeabilidad al vapor de agua (WVP) y mayor porcentaje en la prueba de solubilidad puesto que el mucilago contiene moléculas hidrofílicas que favorece la adsorción de las moléculas de agua. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

Moreno, et. Al, (2019), realizaron el estudio: transformación del almidón de papa, mucílago de nopal y sábila en bioplásticos como productos de valor agregado amigables con el ambiente. La presente investigación experimental se llevó a cabo con el objetivo de obtener un bioplástico amigable con el medio ambiente, como alternativa al uso de polímeros de origen sintético, y con ello disminuir los impactos ambientales generados por los mismos. Para esto, se consideró como materia prima la papa de rezago como fuente de almidón, además de nopal y sábila regionales, como fuente de mucílago. A partir de las propiedades fisicoquímicas analizadas mediante los métodos oficiales de la AOAC se determinó el grado de pureza de los materiales y se utilizó glicerina como agenteplastificante. Se elaboraron películas de 3mm de grosor por 100 mm de largo, a partir de diferentes concentraciones de los materiales, estableciendo un diseño experimental (DOE) 25, dos niveles y cinco factores independientes. Se realizaron 32 tratamientos, con dos replica por tratamiento. Del total de las muestras analizadas solo

6 tratamientos correspondientes al 18.75% cumplieron con los atributos de resistencia al tacto y facilidad de moldeo. La investigación es importante como base de revisión metodológica.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Biopolímeros

Los biopolímeros o polímeros degradables son todas aquellas que garantizan su proceso de degradarse en un sistema biológico, y que se obtienen de todo recurso natural renovable, Según (Rubio, 2019). Estos están categorizados por sus fuentes provenientes las cuales son: de origen microbiano (Ácido poliláctico y polihidroxialcanoatos), de origen marino (quitosano/quitina), de origen agrícola (Lípidos y grasas e hidrocoloides), además del origen animal (colágeno /Gelatina). El nopal tiene entre sus propiedades el ser una planta hidrocoloide pues genera dispersión viscosa o gel, la cantidad de goma o gel que se genere dentro de la planta varía de acuerdo con la cantidad de años de madurez que este tenga (Silva, 2017).

Los bioplásticos son materiales plásticos biodegradables con origen orgánico. Los bioplásticos forman parte de un subgrupo con respecto a los “plásticos biodegradables” que, al igual que los bioplásticos se degradan a través de microorganismos (Ecoembes. 2019).

El bioplástico es un tipo de plástico que se origina a partir de recursos renovables, como el maíz, la caña de azúcar, la papa, el almidón de trigo, entre otros. Estos plásticos

tienen varias características que los diferencian de los plásticos tradicionales, entre ellas (Ecoembes. 2019):

- Biodegradabilidad: se descomponen de manera natural en el medio ambiente, sin dejar residuos tóxicos.
- Sustentabilidad: se producen a partir de recursos renovables, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles.
- Reducción de la huella de carbono: su producción y degradación generan menos gases de efecto invernadero que los plásticos tradicionales.
- Compostabilidad: se pueden convertir en abono, reduciendo la cantidad de residuos que van a los vertederos.
- Renovabilidad: se pueden producir a partir de recursos que se pueden regenerar en un corto período de tiempo.
- No tóxicos: no contienen sustancias químicas dañinas para la salud humana o el medio ambiente.
- Personalizable: se pueden diseñar con diferentes propiedades y características según la necesidad.
- Economía circular: se pueden reciclar y reutilizar, reduciendo la cantidad de residuos y promoviendo una economía más sostenible.

4.2.2 Propiedades del Mucílago de Nopal (*Opuntia Ficus Indica*)

El nopal es originario de América tropical y América subtropical, actualmente se encuentran diversos tipos y en condiciones agroclimáticas en la naturaleza. Hoy en día es cultivado en todo el continente americano. También se extendieron a África, Asia,

Europa y Oceanía cultivadas o descubiertas en su forma salvaje. El nopal pertenece a la familia de los cactus (Alpala, 2016)

Está comprobado que el nopal contiene un mucílago que puede ser utilizado como materia prima para la elaboración de bioplásticos. Algunos estudios que afirman lo expuesto, son los siguientes: (Del Valle, 2020) resalta la importancia del nopal como un polisacárido capaz de formar geles en agua, absorbe grandes cantidades de agua disolviéndose y formando una mezcla viscosa o gelatinosa.

Por otro lado (Gebresamuel, 2021) realizó la comparación de dos especies de nopal *Opuntia ficus indica* y *Opuntia littoralis* dando como resultado que ambos tipos de mucílago son suficientes para impartir la consistencia deseada industrialmente al líquido. Además, (Salinas, 2019) recalca que el mucílago mantiene la capacidad de formar una red estructural, la cual es una característica para la formación de películas, esta cactácea presenta en su estructura química una similitud con algunas gomas comerciales.

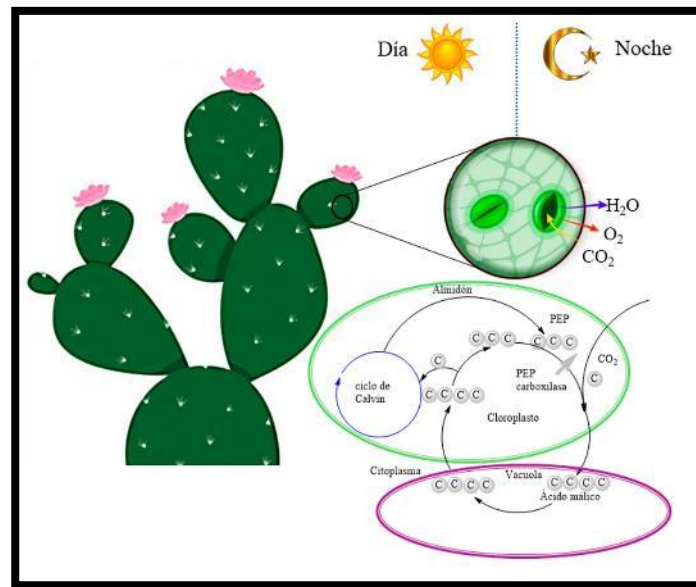
Los nopales tienen sustancias viscosas generalmente llamadas mucílago, esto está constituido por carbohidratos de alto peso molecular y por dos polímeros naturales: amilasa y amilopectina. La amilasa se encuentra formando una cadena helicoidal que en solución tiene la capacidad de formar películas delgadas que, al secar, presentan alta rigidez.

La amilasa es un azúcar del mundo vegetal que todo almidón tiene y es empleado en el proceso de elaboración del bioplástico, debido a que es más fácil el aumentar el volumen entre sus cadenas con un plastificante como el glicerol. (Campos, et. Al, 2019) La amilopectina, como todo compuesto de alto peso molecular, presenta viscosidad

elevada en estado puro, pero es altamente soluble en agua. Cuando se combinan se forma una solución acuosa con características de cohesión y propiedades mecánicas (Orozco, 2017).

En el año 2020 (Espino et al., 2020) desarrolló la caracterización de películas comestibles elaboradas a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*), la concentración que generó buenos resultados en las pruebas desarrolladas por él para la determinación de la calidad del bioplástico fue de 2gr, 1 ml y 50ml de mucílago de nopal, glicerol y agua destilada. Las pruebas que realizó fueron las de Resistencia a la tracción (TS) y la permeabilidad del vapor de agua (VPA) cabe destacar que el resultado óptimo del producto final se puede ver influenciado debido a la correcta homogeneización de todos los insumos que se necesitaron en el proceso de elaboración de la película, pero no es determinante, dado que depende de la cantidad de insumos que se suministre para que el proceso de elaboración sea el correcto y los insumos se integren completamente, de los factores evaluados dentro del proyecto fue la consideración del proceso de degradación específicamente en la del tiempo, siendo la cantidad estimada en relación de 3 a 5 meses debido a que la película de bioplástico presenta un grosor insignificante, el deterioro en su totalidad está ligado directamente al grosor de las películas que estas presenten y al tipo de degradación que se emplee.

Figura 1. *Almidón de Nopal*



Nota: Tomado de Salinas, (2019)

4.2.3 Propiedades de la guadua

La descripción botánica de *Guadua Angustifolia* es un aporte importante como acondicionador de agua, ya que es un bambú tolerante conocido como acero vegetal, útil en pequeños comercios como edificios y ciudades en países grandes (Molina y Montealegre, 2018).

En las características del césped según su descripción botánica tenemos las hojas que tienen un ciclo de vida limitado; después de desarrollarse, cada hoja muere. Según estudios, las gramíneas tienen un máximo número de hojas vivas y por cada hoja nueva que aparece, la hoja más vieja muere. Las partes que se pueden ver en las hojas son de las gramíneas que son plana, limbo o lámina que da unión al tallo y cuando carecen de peciolo, se dice que son sentadas. (Carranza, 2016).

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Amilosa: Amilosa es un polímero lineal de unidades de glucosa conectadas por enlaces α (1-4), en el que puede haber algunos enlaces α (1-6) (Molina, 2018).

Biodegradabilidad: Según (Ruiz, 2023), tiene como objetivo disminuir el impacto ambiental a través una degradación casi instantánea, reincorporándose a la naturaleza en menor tiempo que los plásticos convencionales

Bioplástico: Los polímeros biodegradables provienen de diversas fuentes, desde polímeros sintéticos hasta naturales (Molina, 2018).

Compostabilidad: Capacidad del bioplástico para ser convertido en abono, reduciendo la cantidad de residuos que van a los vertederos (Espino, 2020).

Glicerina: La glicerina es un líquido viscoso incoloro, insípido, higroscópico y dulce (Espino, 2020).

Mucílago: El mucílago de cactus se considera un hidrocoloide natural porque, al igual que las gomas comerciales carragenina y goma guar, se deriva de extractos de plantas (Orozco, 2017).

Plastificantes: Según (Raimond, 2023), los plastificantes son componentes principales de una serie de productos poliméricos, se comportan como lubricantes internos y que permiten que las cadenas de polímeros se deslicen entre si.

Proteínas: Las proteínas son sustancias orgánicas nitrogenadas complejas que se hallan en las células animales y vegetales (Espino, 2020).

Renovabilidad: Capacidad del bioplástico para ser producido a partir de recursos que se pueden regenerar en un corto período de tiempo, como el maíz o la caña de azúcar (Ruiz, 2023).

Sustentabilidad: Capacidad del bioplástico para ser producido a partir de recursos renovables, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y minimizando el impacto ambiental (Ruiz, 2023).

4.4 MARCO CONTEXTUAL

Valledupar, también llamada Ciudad de los Santos Reyes del Valle de Upar, es un municipio colombiano, capital del departamento del Cesar. Está ubicada al nororiente del Caribe Colombiano, a orillas del río Guatapurí, en el valle del río Cesar formado por la Sierra Nevada de Santa Marta al occidente y la serranía del Perijá al oriente (Alcaldía de Valledupar, 2024).

Su territorio es llano y basculado hacia el suroriente mediante una leve pendiente. La ciudad se encuentra a una altitud que oscila entre los 246 m al norte (Planta de Tratamiento de Agua Potable) y 150 m al Sur (conjunto habitacional Casa de Campo), la altitud media es de 168 m (plaza Alfonso López). Además de las enormes estructuras montañosas que la rodean (picos Bolívar y Colón) sobresalen en inmediaciones de la ciudad tres cerros, al Nororiente, el de Cicolac con 330 m s. n. m., el de La Popa con 310 m s. n. m. al Occidente, y en especial el de Murillo que con 1430 m s. n. m. constituye el cerro tutelar de la Ciudad (Alcaldía de Valledupar, 2024).

Valledupar, dada su latitud, se encuentra en la zona de dominios tropicales, posee un clima tropical de sabana Aw donde las características generales del clima son

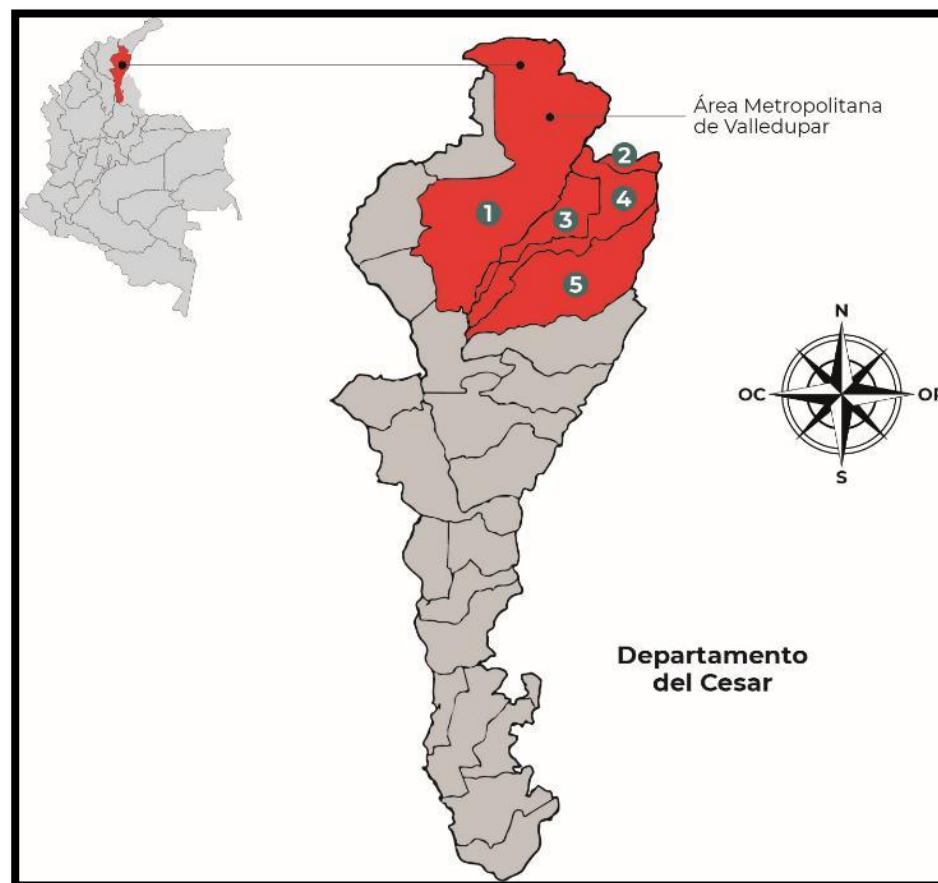
elevadas temperaturas y escasa oscilación térmica anual con un periodo seco intenso y otro de lluvias torrenciales (Alcaldía de Valledupar, 2024).

En cuanto a las temperaturas, según los datos acumulados desde 1969 por el IDEAM en su estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Alfonso López, la temperatura media anual es de 29,8 °C, con mínimas y máximas de 24 °C y 35 °C respectivamente. El mes más caluroso es febrero con un promedio de 35.8 °C y el más fresco es octubre con 28.8 °C (Alcaldía de Valledupar, 2024).

A lo largo del año y aunque las temperaturas son bastante uniformes debido a la posición intertropical de la ciudad, se suceden diversas condiciones climáticas: el mes de enero inicia con mucha brisa y con velocidades del viento de hasta 30 nudos, que en ocasiones es causa de interrupciones en el fluido eléctrico, grandes polvaredas, dificultad para caminar contra el viento y resequedad en la piel de las personas; conforme avanzan los días, la humedad relativa descende paulatinamente y la sensación térmica es muy agradable, sintiéndose incluso bastante fresca durante la noche; febrero y marzo son ya muy secos. (Alcaldía de Valledupar, 2024).



Figura 2. *Ubicación del municipio de Valledupar*



Nota: Tomado archivos Google, 2024

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

4.5 MARCO LEGAL

A continuación, se menciona el soporte o articulado jurídico el cual respalda el desarrollo del tema de estudio en la investigación

Tabla 1. *Normatividad aplicable al proyecto*

NORMA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA 1991	Capítulo 3: De los derechos colectivos y del ambiente. El estado colombiano debe proteger tanto la diversidad como la integridad del medio ambiente y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, con el propósito de garantizar el desarrollo sostenible de la nación, previniendo y controlando factores de deterioro ambiental. (art. 78,79,80,81,82)	Establece el marco legal para la protección del medio ambiente y la promoción del desarrollo sostenible, lo cual es fundamental para el proyecto de bioplástico.

LEY 2232 DE 2022

Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones.

Establece la política nacional de residuos y su gestión integral, lo cual incluye la promoción de la utilización de materiales biodegradables y reciclables, como los bioplásticos.

Ley 1819 de 2016

Por la cual se promueve el impuesto nacional en las industrias del plástico como estrategia para disminuir el consumo de bolsas plásticas en pro del cuidado y preservación del ambiente.

Establece la política nacional de cambio climático y promueve la utilización de tecnologías limpias y sostenibles, como los bioplásticos.

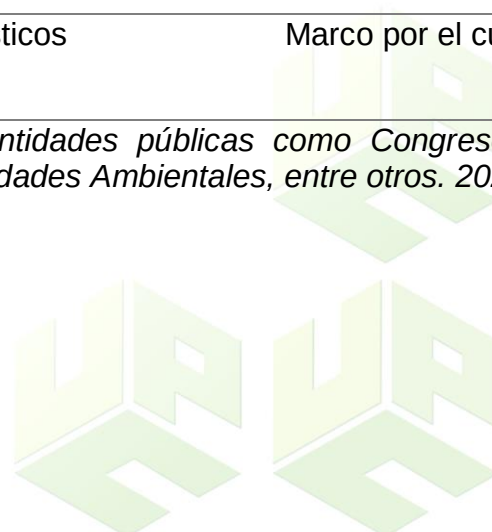
Ley 99 de 1993

Ley general ambiental de Colombia.

Establece el marco legal para la protección del medio ambiente y la promoción del desarrollo sostenible, lo cual incluye la regulación de los residuos y la promoción de la utilización de materiales biodegradables y reciclables.

Decreto 1976 de 2015	Esta versión incorpora las modificaciones introducidas al Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha de su expedición.	Reglamenta la gestión integral de residuos y establece las normas para la utilización de materiales biodegradables y reciclables en el país.
Resolución 0668 de 2016	Mediante el cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas, buscando disminuir la generación de residuos plásticos y aumentar el reciclaje.	Establece las normas para la utilización de bioplásticos en la producción de envases y embalajes.
NTC 5618: 2018	Norma técnica de bioplásticos	Marco por el cual se regirá la investigación.

Nota: Tomado de Fuentes de Información de entidades públicas como Congreso de la República, Departamento Administrativo de la Presidencia, Ministerios, Autoridades Ambientales, entre otros. 2024.



5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. LÍNEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN

Conforme al Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 establecido por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas, la línea, sublínea y área temática a la cual se adscribe esta investigación: Línea: Sostenibilidad y gestión ambiental; Sublínea: Gestión integral de los residuos sólidos y líquidos; Área temática: Transformación y aprovechamiento de los residuos sólidos.

5.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de este proyecto fue cuantitativo porque busca obtener bioplástico a partir de residuos de nogal y guadua de manera medible y cuantificable. Se analizaron los residuos para determinar su potencial, se controlaron y midieron las variables en el proceso de transformación y se evaluaron los resultados en términos de cantidad y calidad de bioplástico producido (Hernández, 2014).

5.3. ALCANCE DE INVESTIGACIÓN

El alcance de investigación fue correlacional. El alcance del proyecto fue correlacional porque buscó establecer una relación entre las variables involucradas en la producción de bioplástico a partir de residuos de nogal y guadua. Específicamente, se buscó identificar y analizar las relaciones entre las características de los residuos (como su composición química y física), las condiciones del proceso de transformación (como la temperatura y el tiempo de procesamiento) y las propiedades del bioplástico producido (como su resistencia y biodegradabilidad). Al establecer estas correlaciones, el proyecto

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

identificó patrones y tendencias que permitan optimizar el proceso de producción de bioplástico y mejorar la calidad del producto final. Además, el enfoque correlacional permitió identificar posibles limitaciones y restricciones en el proceso de producción, lo que facilitará la toma de decisiones informadas y la mejora continua del proceso (Hernández, 2014).

5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Para este proyecto, se seleccionaron dos áreas de estudio como muestra representativa. La primera área consistió en 500 metros cuadrados de cultivos de guadua en el municipio de Pueblo Bello, mientras que la segunda área consistirá en 500 metros cuadrados de cultivos de cactus en el corregimiento de Guacoche. Estas áreas fueron objeto de estudio y análisis para evaluar su potencial en la reducción del riesgo de desastres y la promoción de la resiliencia comunitaria.

5.5. MUESTREO POBLACIONAL

El muestreo se centró específicamente en residuos de guadua y nogal generados en Valledupar. Sin embargo, al considerar la NTC 595 del 2024, se determina tomar un total de 500 gramos de muestra para realizar los ensayos correspondientes. Esto garantizó un muestreo representativo y suficiente para obtener resultados precisos y confiables en la investigación.

5.6. DESARROLLO METODOLÓGICO

Fase 1. Determinar las cantidades adecuadas para la elaboración de bioplástico a partir fibra de guadua y mucilago de nopal.

Actividad 1.1 Revisión bibliográfica

Descripción: Se llevó a cabo una revisión documental exhaustiva con el objetivo de recopilar información de investigaciones previas que hayan obtenido resultados exitosos en la producción de bioplásticos a partir de residuos orgánicos, con un enfoque particular en el uso de guadua y mucilago en nogal como materias primas. Esta revisión permitió identificar los enfoques y métodos más efectivos empleados por otros autores, así como los desafíos y limitaciones que han enfrentado, con el fin de informar y guiar el desarrollo de nuestra propia investigación en este campo.

Actividad 1.2 Caracterizar los residuos.

Descripción:

Extracción del mucilago de nogal:

Para la extracción del mucilago del nopal y la guadua se tomó como base el método de Mounir et al. (2020). La actividad consistió en recolectar residuos de nogal y guadua. Luego se procedió a clasificar y limpiar los residuos para eliminar cualquier material contaminante. Una vez limpios, se trituraron los residuos en trozos pequeños para aumentar su superficie y facilitar su procesamiento.

El mucilago es una sustancia gelatinosa y espesa que se encuentra en la semilla del nogal. A continuación, se menciona el paso a paso para la obtención de mucilago de nogal.

1. Recolectar los nogales: Se recolectan los residuos de nogal maduros y se limpian manualmente para eliminar cualquier material contaminante como tierra, arena o

restos de otros materiales. Se utilizaron herramientas como pinceles, cepillos o paños para eliminar cualquier residuo suelto.

2. Remoja las semillas: Colocar las semillas en un recipiente con agua tibia durante al menos 24 horas. Esto ayudará a suavizar la cubierta exterior y facilitar la extracción del mucilago.

3. Tritura las semillas: Después del remojo, se trituraron las semillas en un molinillo o procesador de alimentos hasta obtener una consistencia homogénea.

4. Extrae el líquido: se cuela el líquido resultante a través de un paño o papel de café en un recipiente. Este líquido contiene el mucilago.

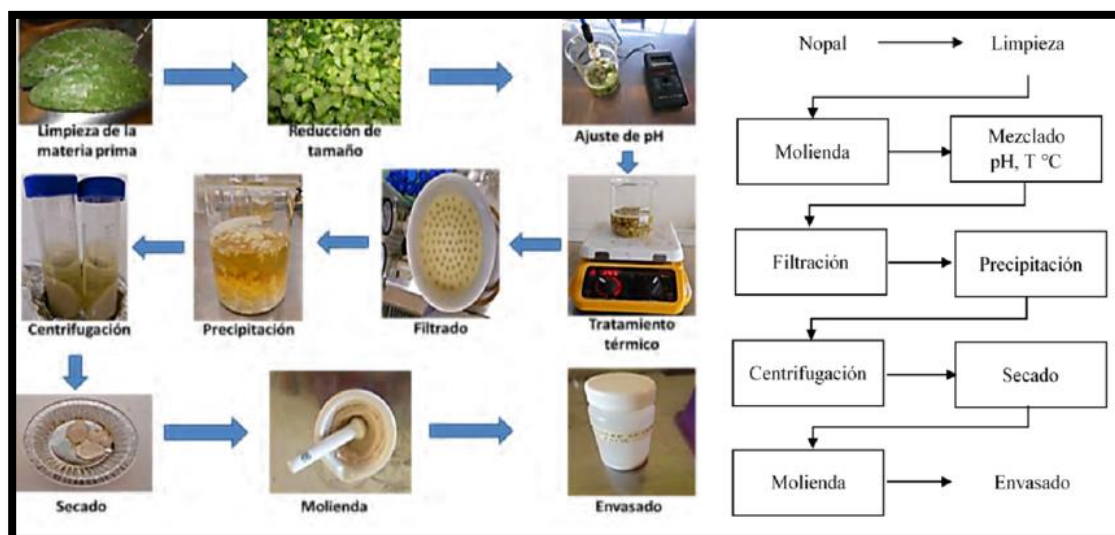
5. Filtra el líquido: Si el líquido contiene impurezas, repite el proceso de filtración hasta obtener un líquido transparente y claro.

6. Evaporación: se calentó el líquido filtrado a fuego lento hasta que se evapore el agua y quede una sustancia gelatinosa y espesa, que es el mucilago.

7. Secado: Extiende el mucilago en una superficie plana y déjalo secar a temperatura ambiente o en un desecador. Una vez seco, puedes almacenarlo en un recipiente hermético.

Figura 3. *Extracción del mucilago de nogal*





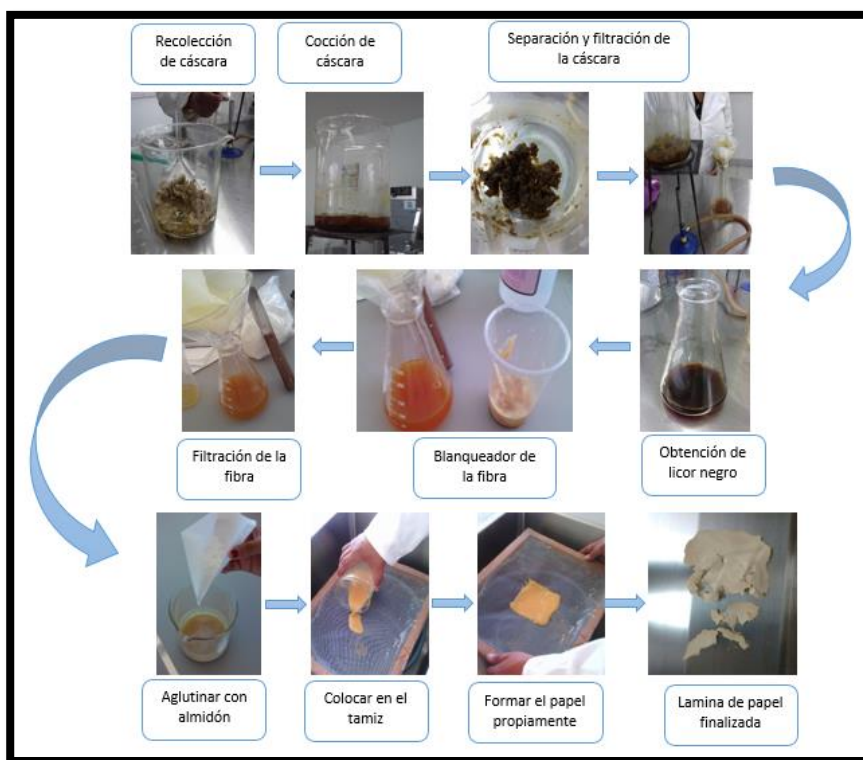
Nota: Tomado de Juárez, 2024.

Extracción de la fibra de guadua:

El proceso para obtener la pulpa y la fibra de guadua es el siguiente:

1. Corte y recolección: Se cortan los tallos de guadua y se recolectan. Se utilizaron herramientas como pinceles, cepillos o paños para eliminar cualquier residuo suelto.
2. Trituración: Los tallos se trituran para obtener una mezcla de pulpa y fibra. en un molinillo o procesador de alimentos hasta obtener una consistencia homogénea.
3. Separación: La pulpa y la fibra se separan mediante un proceso de cribado o centrifugación. La pulpa es la parte más fina y se utiliza para producir bioplásticos, mientras que la fibra es la parte más gruesa y se puede utilizar para producir papel, cartón u otros productos.
4. Limpieza: La pulpa y la fibra se limpian para eliminar impurezas

Figura 4. *Obtención de fibra de guadua*



Nota: Tomado de Juárez, 2024.

Actividad 1.3: Caracterización de la fibra de guadua y mucilago de nogal

Descripción: el proceso de caracterización de la fibra y el mucilago obtenidos a partir de nogal y guadua, se realizarán por medio de pruebas de laboratorio para determinar las características físicas, específicamente:

Tabla 2. *Caracterización física*

Parámetro	Descripción	Ejemplo de valoración
-----------	-------------	-----------------------

Color

Se comparará el color de las fibras de guadua y nogal con un patrón de color establecido, utilizando un sistema de colorimetría.

Tipo de Bioplástico Type of Bioplastic	Concentración de oligoelementos en el suelo Oligoelement concentration increase in soil	Control de malas hierbas Weed control	Fisiología del cultivo Physiological state of crops	Estado del bioplástico después de la cosecha Bioplastic integrity at harvest	Biodegradabilidad en el suelo Soil biodegradability	Parámetros de calidad Quality parameters	Producción y fisiopatías Production and physiopathies
Control	●	●	●	●	●	●	●
A	●	●	●	●	●	●	●
B	●	●	●	●	●	●	●
C	●	●	●	●	●	●	●

Verde: Efecto positivo, Naranja: Sin beneficio, Rojo: Efecto negativo

Distribución del tamaño

Se analizará la distribución de tamaños de gránulos de cada fibra, utilizando un tamiz o un analizador de tamaño de partículas.



Materia seca

Se determinará la cantidad de materia seca en cada fibra, utilizando un método de secado en estufa.



Nota: Tomado de Juárez, 2024.

Se tomará la metodología de Juárez, 2024.

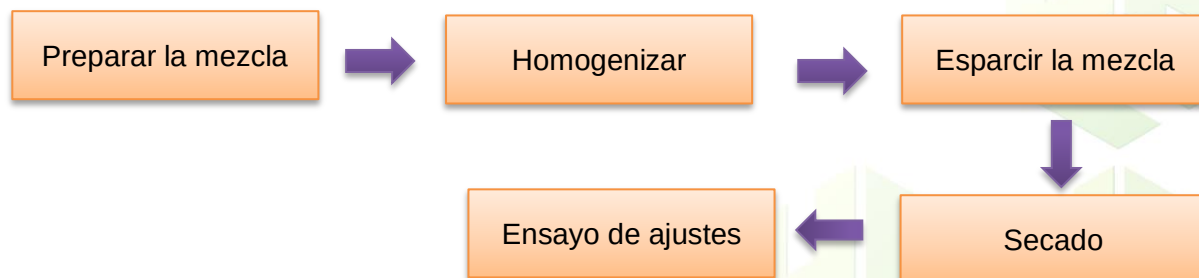
Actividad 1.4: Establecer mediante ensayos de laboratorio las proporciones adecuadas por el método de Juárez (2024).

Descripción: Determinar las dosis óptimas de fibra, mucilago, ácido acético, glicerina y agua para producir bioplástico con propiedades físicas y químicas deseadas.

Metodología según Juárez (2024):

1. Preparación de la mezcla: Se midieron las cantidades de fibra de guadua y nogal, mucilago, ácido acético, glicerina y agua según las proporciones establecidas.
2. Homogeneización: Se mezcló todo en un beaker hasta obtener una mezcla homogénea.
3. Esparramado: Se esparció la mezcla en una lámina de aluminio y se llevó al horno a 80°C durante 1 hora.
4. Secado: Se retiraron las láminas de bioplástico del horno y se extrajeron de las láminas de aluminio.
5. Ensayos de ajustes: Se realizaron ensayos de ajustes según la metodología de Juárez (2024) para evaluar las propiedades físicas y químicas del bioplástico producido.

Figura 5. Procedimiento



Nota: Elaborado por el autor, 2024

Variables a evaluar:

- Dosis de fibra de guadua y nogal
- Dosis de mucilago
- Dosis de ácido acético
- Dosis de glicerina
- Dosis de agua

Resultados esperados:

- Se establecieron las dosis óptimas para producir bioplástico con propiedades físicas y químicas deseadas.
- Se evaluaron las propiedades físicas y químicas del bioplástico producido.
- Se determinaron las condiciones óptimas para la producción de bioplástico a partir de fibra de guadua y nogal

Actividad 1.5: Elaborar bioplástico con la mezcla obtenida.

Elaborar el bioplástico utilizando la materia prima obtenida en la etapa anterior y siguiendo la metodología de Celedón et al. (2022).

Metodología:

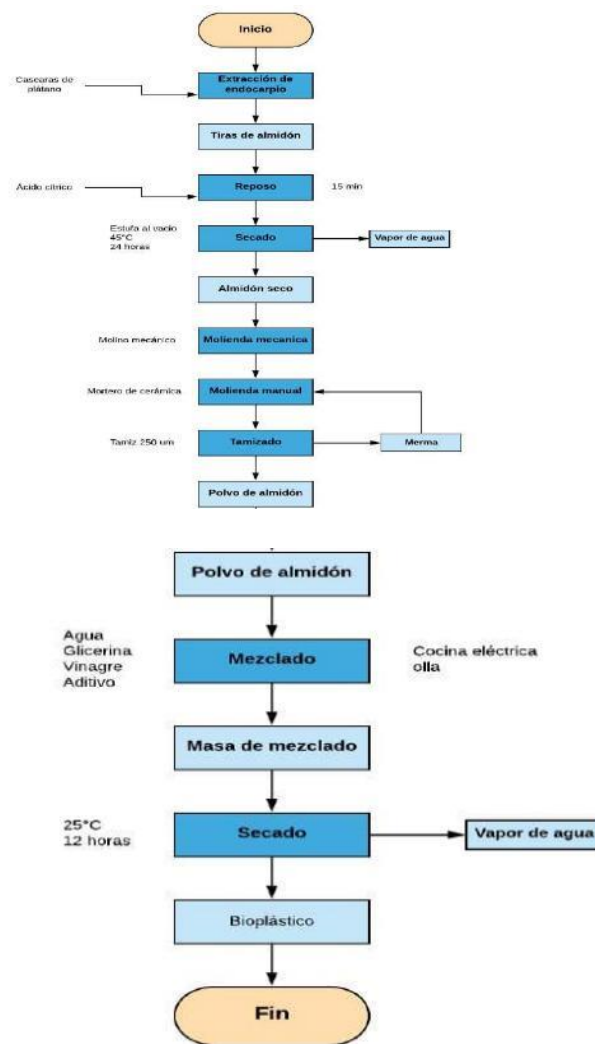
1. Pesaje de materia prima: Se pesó la materia prima obtenida en la etapa anterior y se colocará en un vidrio de reloj.
2. Mezcla de ingredientes: Se mezcló la materia prima con vinagre blanco, glicerina y agua destilada en una olla.
3. Homogeneización: Se revolvieron los ingredientes hasta obtener una mezcla homogénea.

4. Calentamiento: Se calentó la mezcla a fuego bajo y luego a temperatura media, revolviendo constantemente.

5. Esparcimiento: Se esparció la mezcla en láminas de vidrio y se secó en horno a 35°C durante 39 horas y 20 minutos.

6. Secado y separación: Se retiraron las láminas de bioplástico del horno y se separaron de las láminas de vidrio.

Figura 6. Proceso de obtención del bioplástico



Nota: El gráfico presenta el proceso general para obtener bioplástico.

Fase 2. Identificar mediante ensayos de densidad, biodegradabilidad y resistencia a la tracción, las características físico-mecánicas del bioplástico siguiendo los lineamientos de la norma NTC 595 de 2024

Actividad 2.1 Ensayos físico-mecánicos

Descripción: identificar las características físico-mecánicas (densidad, resistencia a la tracción, biodegradabilidad) del bioplástico elaborado a partir de residuos de guadua y nopal basado en la norma NTC 595:2024

Prueba de densidad

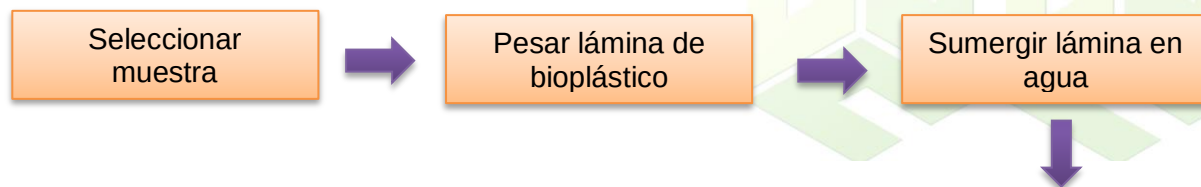
- Objetivo: Medir la densidad de los bioplásticos de nopal y guadua.

Materiales necesarios:

- Peso
- Bioplástico de nopal y guadua
- Procedimiento:

1. Seleccionar una muestra de bioplástico de nopal y guadua.
2. Medir la masa de la muestra utilizando una balanza.
3. Sumergir la muestra en un líquido de densidad conocida (agua).
4. Medir el volumen de la muestra sumergida utilizando un densímetro.
5. Calcular la densidad de la muestra utilizando la fórmula: $\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$.

Figura 7. Procedimiento



Cálculo de la
densidad

Medir el volumen

Nota: Elaborado por el autor, 2024

Prueba de resistencia a la tracción

- Objetivo: Medir la resistencia a la tracción de los bioplásticos de nopal y guadua.

Materiales necesarios:

- Una balanza (puede ser una balanza de cocina o una balanza de laboratorio)
- Una regla (puede ser una regla de plástico o de metal)
- El bioplástico de guadua y nopal

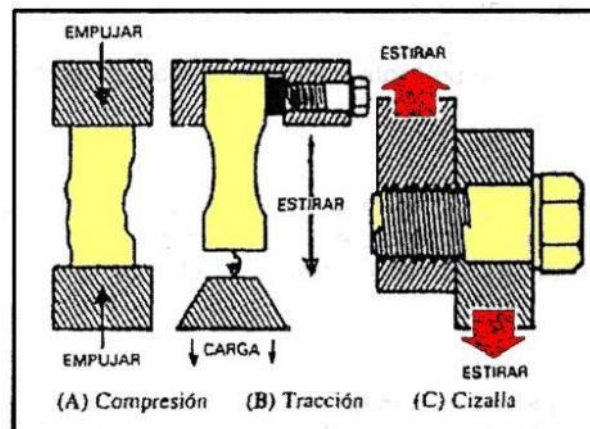
Procedimiento:

1. Colocar el bioplástico entre la balanza y la regla, de manera que quede suspendido en el aire.
 2. Ajustar la balanza para que esté en equilibrio, es decir, que la aguja esté en el centro.
 3. Comenzar a tirar suavemente del bioplástico hacia arriba, mientras observa la balanza.
 4. La balanza comenzará a moverse hacia arriba, indicando que el bioplástico está siendo sometido a una fuerza.
 5. Continúa tirando del bioplástico hasta que se rompa.
 6. En el momento en que el bioplástico se rompe, anotar el valor que muestra la balanza.
- Este valor es la resistencia a la tracción del bioplástico.

Notas importantes:

- Asegurarse de que la balanza esté calibrada correctamente antes de realizar el experimento.
- Utilizar una regla lo suficientemente larga para que el bioplástico quede suspendido en el aire y no se toque con la superficie de la balanza.
- Asegurarse de tirar del bioplástico de manera uniforme y constante para obtener resultados precisos.
- Repetir el experimento varias veces para obtener resultados consistentes.

Figura 8. *Tracción y elongación del bioplástico*



Nota: Tomado de Juárez, 2024.

Biodegradabilidad

Análisis de biodegradabilidad en agua

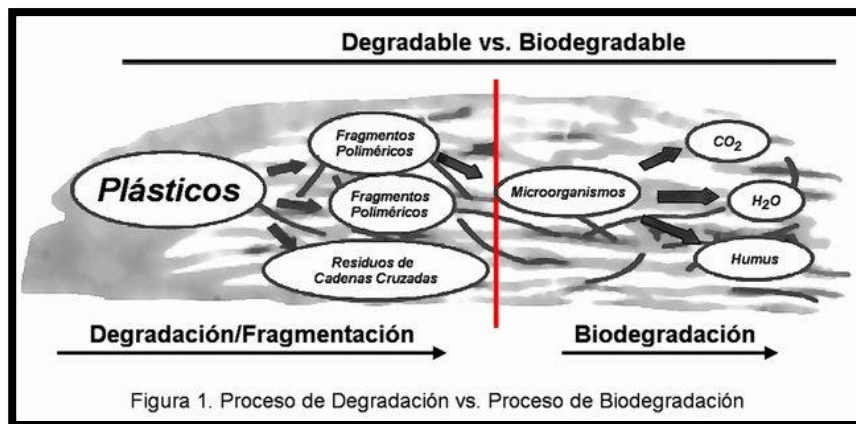
- Objetivo: Evaluar la velocidad de biodegradación y el porcentaje de pérdida de peso de las láminas de bioplástico en agua.
- Materiales:
 - 3 láminas de bioplástico de cascaras de mucílago de nogal
 - 3 láminas de bioplástico de cascaras de guadua

- 250 ml de agua del río Guatapurí

- Procedimiento:

1. Sumergir las láminas de bioplástico individualmente en el agua durante 4 días.
2. Sacar las láminas diariamente y dejarlas secar por 24 horas.
3. Pesar las láminas para determinar la masa perdida con el paso del tiempo.
4. Repetir el proceso con todas las láminas para obtener resultados precisos.

Figura 9. Biodegradabilidad en agua



Nota: Tomado de Miranda (2020).

Análisis de biodegradabilidad en suelo

- Objetivo: Evaluar la capacidad de los bioplásticos de cascaras de guadua y nogal para biodegradarse en suelo húmedo.

- Materiales:

- Láminas de bioplástico de cascaras de guadua y nogal
- Suelo húmedo

- Procedimiento:

1. Enterrar las láminas de bioplástico en suelo húmedo.

2. Evaluar la pérdida de peso y la velocidad de biodegradación después de un determinado período.

Fase 3. Valorar mediante ensayos ambientales, técnicos y económicos, la viabilidad del bioplástico a partir de fibra de guadua y mucilago de nopal.

Actividad 3.1 Viabilidad ambiental

Descripción: evaluar el impacto ambiental del bioplástico en comparación con los plásticos tradicionales.

Objetivo: Determinar la cantidad de CO₂ equivalente emitida por el bioplástico en comparación con los bioplásticos convencionales.

Materiales necesarios:

- Datos sobre la producción del bioplástico (materia prima, energía utilizada, procesos de fabricación, etc.)
- Datos sobre las emisiones de CO₂ equivalentes de los bioplásticos convencionales
- Herramienta de cálculo de huella de carbono (hoja de cálculo Excel).

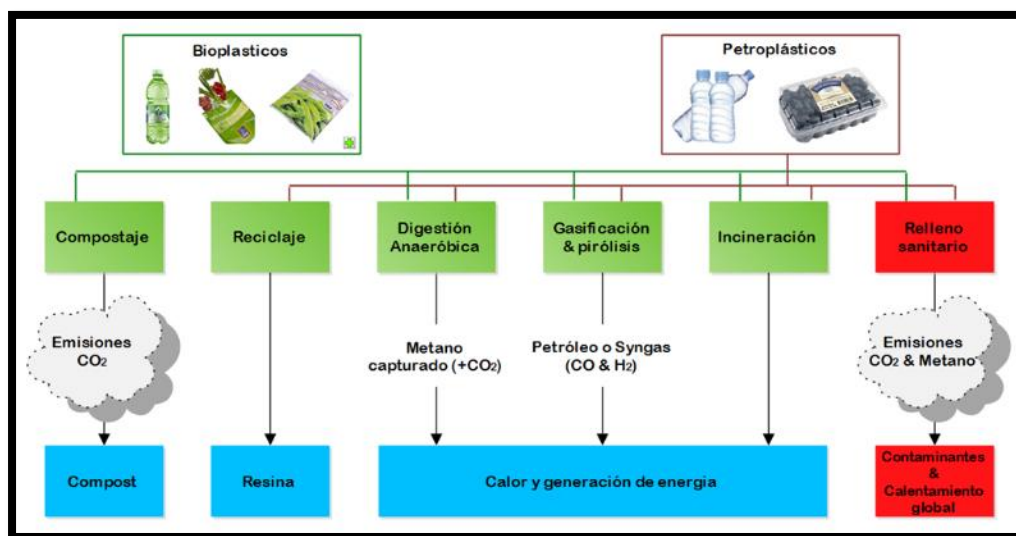
Procedimiento:

1. Recopilar los datos sobre la producción del bioplástico, incluyendo la materia prima utilizada, la energía consumida y los procesos de fabricación.
2. Utilizar una herramienta de cálculo de huella de carbono para determinar las emisiones de CO₂ equivalentes del bioplástico en cada etapa de su ciclo de vida (producción, transporte, uso y disposición final).

3. Comparar los resultados con los datos de las emisiones de CO₂ equivalentes de los bioplásticos convencionales.

4. Analizar los resultados y determina si el bioplástico tiene un impacto ambiental menor o mayor que los bioplásticos convencionales.

Figura 10. Viabilidad ambiental



Nota: Tomado de Cortes, 2019.

Actividad 3.2 Viabilidad técnica

Descripción: Comparar las propiedades del bioplástico con las de los plásticos convencionales y otros bioplásticos en términos de resistencia a la tensión, resistencia a la temperatura, absorción de agua y tiempo de biodegradabilidad.

Materiales necesarios:

- Resultados de las pruebas de bioplástico (tensión, temperatura, absorción de agua, tiempo de biodegradabilidad)

- Datos de las propiedades de los plásticos convencionales (polietileno, polipropileno, PVC, etc.)

- Datos de las propiedades de otros bioplásticos (PLA, PBAT, PHB, etc.)

Procedimiento:

1. Reunir los resultados de las pruebas de bioplástico y organizarlos en una tabla

2. Investigar y recopilar datos sobre las propiedades de los plásticos convencionales y otros bioplásticos.

3. Comparar las propiedades del bioplástico con las de los plásticos convencionales y otros bioplásticos en términos de:

- Resistencia a la tensión: ¿Cuánta tensión puede soportar el bioplástico en comparación con los plásticos convencionales y otros bioplásticos?

- Resistencia a la temperatura: ¿Cuánta temperatura puede soportar el bioplástico en comparación con los plásticos convencionales y otros bioplásticos?

- Absorción de agua: ¿Cuánta agua puede absorber el bioplástico en comparación con los plásticos convencionales y otros bioplásticos?

- Tiempo de biodegradabilidad: ¿Cuánto tiempo tarda en biodegradarse el bioplástico en comparación con los plásticos convencionales y otros bioplásticos?

4. Analizar los resultados y determinar las ventajas y desventajas del bioplástico en comparación con los plásticos convencionales y otros bioplásticos.

Por otra parte, se aplicará el diseño experimental 2x2. Un diseño experimental factorial 2x2 es un tipo de diseño experimental en el cual hay dos factores independientes, cada uno con dos niveles. En este caso, los dos factores son el tipo de

residuo (guadua o nopal) y la temperatura de procesamiento (alta o baja). Para el diseño experimental se tendrá en cuenta la investigación de Cardona (2019).

- Factor 1: Tipo de residuo
 - Nivel 1: Guadua
 - Nivel 2: Nopal
- Factor 2: Temperatura de procesamiento
 - Nivel 1: Alta (180°C)
 - Nivel 2: Baja (120°C).

El diseño experimental factorial 2x2 tiene cuatro combinaciones posibles de factores y niveles:

- Combinación 1: Guadua - Alta temperatura
- Combinación 2: Guadua - Baja temperatura
- Combinación 3: Nopal - Alta temperatura
- Combinación 4: Nopal - Baja temperatura

En este diseño experimental, se pueden evaluar los efectos de cada factor y la interacción entre ellos.

Actividad 3.3 Análisis económico

Descripción: Comparar el costo de producción de una lámina de bioplástico de 1 m por 0.5 cm con los precios del mercado.

Datos:

- Costo de producción de una lámina de bioplástico de 1 m por 0.5 cm: 50,000 pesos
- Precios del mercado para láminas de bioplástico similares: 34,000 - 100,000 pesos

Actividad:

1. Investigar y recopilar datos sobre los costos de producción de diferentes tipos de bioplásticos y sus precios en el mercado.

2. Comparar el costo de producción del bioplástico con los precios del mercado.

¿Es competitivo?

3. Analizar las razones por las que el costo de producción del bioplástico puede ser mayor o menor que los precios del mercado.

4. Determinar si es posible reducir los costos de producción para hacer que el bioplástico sea más competitivo en el mercado.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Determinación de las cantidades adecuadas para la elaboración de bioplástico a partir fibra de guadua y mucílago de nopal.

6.1.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica constituyó una herramienta clave para sustentar la viabilidad del uso de fibra de guadua y mucílago de nopal en la elaboración de bioplásticos. A través de este ejercicio, se recopilaron y analizaron estudios previos relacionados con la producción de bioplásticos a partir de residuos orgánicos, identificando experiencias exitosas, metodologías utilizadas, resultados obtenidos y limitaciones encontradas, lo que permitió reconocer los aportes de distintos autores y establecer un marco comparativo que guiará la definición de las cantidades adecuadas de las materias primas seleccionadas en la presente investigación.

Tabla 3. Revisión documental

Autor(es) /	Materia prima	Metodología	Resultados	Limitaciones
Año	utilizada	empleada	principales	identificadas
López et al. (2018)	Nopal (mucílago)	Extracción del mucílago, mezcla con glicerina y almidón	Obtuvo bioplástico biodegradable con buena flexibilidad y resistencia moderada	Baja durabilidad frente a la humedad

			Incorporación	Mejoró	la	Procesos	de
García y Torres (2019)	Fibra de bambú/guadua		de fibras en matriz polimérica con almidón	resistencia mecánica disminuyó degradación rápida		secado y molienda de la fibra aumentan los costos	
Hernández et al. (2020)	Nopal almidón maíz	+	Gelatinización y mezcla con plastificantes	Produjo láminas uniformes y maleables, con alta biodegradabilidad		Limitada resistencia al agua	
Pérez et al. (2021)	Guadua angustifolia		Polvo de fibra tratada con álcali + glicerina	Incremento en la resistencia a la tracción y rigidez del material		Falta de flexibilidad en productos finales	
Ramírez y Cárdenas (2022)	Combinación de mucílago de nopal y fibras vegetales		Mezcla en caliente moldeado en placas	Obtención de bioplástico y resistente en biodegradable, con balance entre rigidez y elasticidad		Necesidad de optimizar y proporciones para mejorar homogeneidad	

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El análisis de los documentos revisados muestra que tanto la fibra de guadua como el mucílago de nopal poseen propiedades favorables para la producción de bioplásticos,

aunque presentan limitaciones cuando se emplean de forma aislada. El mucílago de nopal aporta flexibilidad, biodegradabilidad y facilidad de procesamiento, pero su resistencia mecánica y estabilidad frente a la humedad son reducidas. Por otro lado, la fibra de guadua contribuye significativamente al refuerzo estructural, mejorando la rigidez y la resistencia del material, aunque puede disminuir la flexibilidad y aumentar la complejidad del proceso de elaboración. Dado lo anterior, la literatura respalda que la combinación de ambos materiales resulta prometedora, pues permite complementar las debilidades individuales y generar un bioplástico con mejores propiedades físicas, mecánicas y de biodegradación.

A continuación, se presenta una matriz comparativa con las principales propiedades de estas materias primas, identificadas en estudios previos, que las hacen óptimas para su aprovechamiento en la elaboración de bioplásticos.

Tabla 4. *Características de la materia prima según la revisión*

Materia prima	Características físicas	Características químicas	Propiedades	
			funcionales en bioplásticos	Referencias
Fibra de guadua	Alta resistencia mecánica, rigidez, baja densidad, fácil disponibilidad	Alto contenido de celulosa (60–70%), hemicelulosa (15–25%) y lignina (10–15%)	Refuerzo estructural, mejora la resistencia a la tracción, aumenta la rigidez y durabilidad del material	García & Torres (2019); Pérez et al. (2021)

en regiones

tropicales

		Polisacáridos	
Mucílago de nopal	Textura viscosa,	(pectinas,	Aporta plasticidad,
	soluble en agua,	arabinosa,	flexibilidad, cohesión,
o de nopal	flexible, fácil de	galactosa y	alta biodegradabilidad,
	extraer	ramnosa),	alto capacidad de formar
		contenido de	películas uniformes
		agua y minerales	

López et al.
(2018);
Hernández
et al. (2020)

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

La fibra de guadua, rica en celulosa, actúa como un refuerzo natural que incrementa la resistencia mecánica y prolonga la vida útil del material, aunque su rigidez puede restar flexibilidad. Por su parte, el mucílago de nopal, compuesto por polisacáridos con propiedades viscoelásticas, confiere maleabilidad, cohesión y capacidad para formar láminas biodegradables, aunque presenta baja resistencia a la humedad. La combinación de ambos materiales se perfila como una estrategia óptima para equilibrar rigidez y flexibilidad, garantizando un bioplástico funcional, biodegradable y con potencial de aplicación en empaques sostenibles y otros productos de uso cotidiano.

6.1.2 Caracterizar los residuos.

- **Extracción del mucilago de nogal:**

La extracción del mucílago de nogal se realizó siguiendo el método adaptado de Mounir et al. (2020). El procedimiento comprendió varias etapas consecutivas, que se detallan a continuación:

Tabla 5. *Extracción del mucilago de nogal*

Paso	Descripción del procedimiento	Evidencia fotográfica
1. Recolección y limpieza	Se recolectaron semillas de nogal maduras y en buen estado. Posteriormente, se limpiaron manualmente con cepillos, pinceles o paños para eliminar tierra, arena y otros contaminantes.	

- Las semillas limpias se colocaron en un
- 2. Remojo** recipiente con agua tibia durante 24 horas para
- de semillas** suavizar la cubierta externa y facilitar la liberación del mucílago.



- 3.** Después del remojo, las semillas se trituraron
- Trituración** en un molinillo o procesador de alimentos hasta obtener una mezcla homogénea.



4. La mezcla se filtró a través de un paño o papel
Extracción de café, separando el líquido mucilaginoso de
del líquido los restos sólidos.



**5. Filtración
adicional**

En caso de impurezas, el líquido se filtró
nuevamente hasta obtener un extracto claro y
uniforme.



El extracto filtrado se calentó a fuego lento para evaporar el exceso de agua, concentrando el mucílago en una sustancia gelatinosa y espesa. El mucílago se extendió sobre una superficie plana y se dejó secar a temperatura ambiente o en un desecador. Finalmente, se almacenó en un recipiente hermético.



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

- **Extracción de la fibra y pulpa de guadua**

La extracción de la pulpa y la fibra de guadua, se realizó siguiendo el método adaptado de Juárez (2024). El procedimiento comprendió varias etapas consecutivas, que se detallan a continuación:

Tabla 6. *Proceso de extracción de la pulpa y la fibra de guadua*

Paso	Descripción del procedimiento	Evidencia fotográfica
------	-------------------------------	-----------------------

1. Corte y recolección

Se cortaron los tallos de guadua seleccionados y se recolectaron. Posteriormente, se limpiaron con cepillos, pinceles o paños para retirar restos de tierra, polvo y material adherido.



2. Trituración

Los tallos limpios fueron triturados en un molino o procesador de alimentos, hasta obtener una mezcla homogénea compuesta por pulpa y fibra.



3. Separación

La mezcla obtenida se sometió a un proceso de cribado o centrifugación, logrando separar la pulpa (más fina, destinada a bioplásticos) y la fibra (más gruesa, aprovechable en papel o cartón).



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025



6.1.3: Caracterización de la fibra de guadua y mucilago de nogal

El proceso de caracterización se llevó a cabo en laboratorio siguiendo la metodología planteada por Juárez (2024). Para ello, se analizaron tres parámetros físicos fundamentales: color, distribución del tamaño y contenido de materia seca. Estos parámetros permiten establecer la viabilidad de la fibra de guadua y el mucílago de nogal como materias primas en la elaboración de bioplásticos, ya que influyen directamente en la resistencia mecánica, la homogeneidad y la estabilidad del material resultante.

Tabla 7. Resultados de la caracterización

Parámetro	Descripción de la prueba	Resultado	Fotografía
FIBRA DE GUADUA			
Color	Comparación con patrón de color	Tonalidad amarillenta oscura	

Distribución del tamaño	Tamizado en malla de 250 μm y 500 μm .	65% de partículas < 250 μm , 35% entre 250–500 μm .	
Materia seca	Secado en estufa a 105 °C por 24 h.	91% de materia seca; humedad residual del 9%.	

FIBRA DE NOGAL

Parámetro	Descripción de la prueba		Resultado	Fotografía
Color	Comparación con patrón de color.	con	Tonalidad verde claro	
Distribución del tamaño	Análisis mediante dispersión y tamiz fino de 150 μm .	mediante	72% de gránulos < 150 μm , 28% entre 150–300 μm .	

Materia seca Secado en estufa a 85% de materia
105 °C por 24 h. seca; humedad
residual del 15%.



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Los resultados obtenidos muestran que la fibra de guadua presenta un mayor contenido de materia seca (91%) y una coloración más clara, lo cual favorece la elaboración de bioplásticos con buena resistencia y uniformidad (Salazar et al., 2022). Por su parte, el mucílago de nogal exhibe un tamaño de partícula más fino y mayor proporción de humedad residual (15%), lo que le confiere propiedades adhesivas útiles para la cohesión del material, aunque requiere un secado más prolongado para evitar problemas de degradación (Pazmiño, 2021).

La combinación de ambas materias primas resulta óptima, ya que la guadua aporta rigidez y estabilidad estructural, mientras que el mucílago contribuye como agente aglutinante natural, mejorando la cohesión y flexibilidad del bioplástico (Pazmiño, 2021).

6.1.4: Establecimiento de las proporciones adecuadas

El procedimiento experimental se aplicó de manera uniforme a ambas materias primas (fibra de guadua y mucílago de nogal), siguiendo la metodología descrita por Juárez (2024). A continuación, se presenta la secuencia de actividades en forma de matriz:

Tabla 8. *Establecimiento de las dosis óptimas*

Etapa	Descripción	Aplicación en guadua y nogal	Foto
1. Preparación de la mezcla	Se midieron las cantidades de fibra de guadua, mucílago de nogal, ácido acético, glicerina y agua de acuerdo con proporciones predeterminadas.	El procedimiento fue el mismo para ambas materias primas; se realizaron varias pruebas con proporciones variables para determinar la óptima.	
2. Homogeneización	Los ingredientes fueron mezclados hasta obtener una mezcla homogénea.	Tanto la fibra como el mucílago se incorporaron de manera gradual para garantizar una distribución uniforme.	

3. Esparramado

La mezcla resultante se esparció sobre láminas de aluminio para formar capas delgadas.

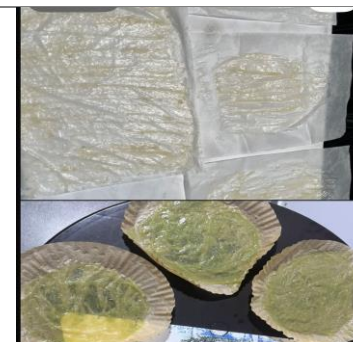
Se prepararon láminas de guadua y de nogal bajo las mismas condiciones de trabajo.



5. Secado y extracción

Tras el horneado, las láminas se retiraron y se separaron cuidadosamente del aluminio.

Se obtuvieron láminas diferenciadas de bioplástico de guadua y de nogal, listas para los ensayos de ajuste.



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Conforme a lo anterior, se procedió a realizar la mezcla de proporciones para determinar la adecuada.

Tabla 9. *Mezcla de proporciones*

ID	Guadua fibra (%)	Mucílago (%)	Glicerina (%)	Ácido acético (%)	Agua (%)	Comentario breve
G-A (NO adecuada)	60	10	5	2	23	Exceso de fibra: mezcla heterogénea, mala formación de película, frágil y con baja cohesión.
G-B (NO adecuada)	10	60	10	2	18	Exceso de mucílago: película muy flexible/pegajosa, baja resistencia mecánica y alta absorción de humedad.
G-C (Óptima)	35	30	10	2	23	Equilibrio fibra-matriz-plastificante:

buena cohesión,
resistencia y
flexibilidad
aceptable.

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Figura 11. *Fibras no adecuadas*



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El análisis comparativo de las formulaciones A, B y C evidencia que la proporción relativa entre fibra de guadua y mucílago es determinante para la calidad del bioplástico. En la formulación G-A (60 % fibra, 10 % mucílago), el exceso de refuerzo genera una mezcla poco homogénea y con deficiente cohesión, lo que se traduce en láminas quebradizas y frágiles. Según Faruk et al. (2012), cuando el contenido de fibra supera la

capacidad de la matriz de recubrirla, se producen zonas débiles por falta de adhesión interfacial, disminuyendo significativamente la resistencia mecánica.

Por el contrario, la formulación G-B (10 % fibra, 60 % mucílago) presentó un exceso de matriz polisacáridica, lo que ocasiona películas demasiado blandas, pegajosas y con baja resistencia mecánica. Esto coincide con lo reportado por Mounir et al. (2020), quienes advierten que altas concentraciones de mucílago incrementan la higroscopicidad del material, aumentando su capacidad de absorción de humedad y reduciendo su estabilidad estructural.

Finalmente, la formulación G-C (35 % fibra, 30 % mucílago) demostró ser la más adecuada, dado que logra un equilibrio entre rigidez y flexibilidad. En esta combinación, la fibra de guadua aporta un refuerzo estructural gracias a su alto contenido de celulosa, mientras que el mucílago forma una matriz filmógena que asegura la cohesión del material. Además, la adición de glicerina en un 10 % mejora la plasticidad, evitando la fragilidad observada en G-A. Juárez (2024) señala que las proporciones equilibradas de matriz y refuerzo permiten obtener bioplásticos con mejores propiedades mecánicas y menor susceptibilidad a la humedad.

En conclusión, la formulación G-C es la más favorable, pues combina la capacidad de refuerzo de la guadua con la filmogenicidad del mucílago, generando un material más resistente, flexible y funcional para aplicaciones de bioplástico.

6.1.5: Elaboración de bioplástico con la mezcla obtenida.

Para la elaboración del bioplástico se utilizó como base la materia prima obtenida en la etapa anterior, siguiendo la metodología adaptada de Celedón et al. (2022). En

primer lugar, se realizó el pesaje de la materia prima, la cual fue dispuesta cuidadosamente en un vidrio de reloj con el fin de garantizar precisión en las cantidades requeridas para la preparación.

Posteriormente, se procedió a la mezcla de los ingredientes. La materia prima se combinó con vinagre blanco, glicerina y agua destilada en una olla, siguiendo las proporciones establecidas en el protocolo. Este proceso permitió integrar los insumos necesarios para favorecer las propiedades físicas del bioplástico. Una vez reunidos los componentes, se llevó a cabo la homogeneización, que consistió en revolver la mezcla de manera constante hasta obtener una sustancia uniforme y sin grumos.

Figura 12. Láminas de bioplásticos finales



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

En la etapa de calentamiento, la mezcla fue expuesta inicialmente a fuego bajo y luego a una temperatura media, manteniendo el movimiento constante para evitar su solidificación prematura o formación de burbujas indeseadas. Una vez alcanzada la textura adecuada, la mezcla se sometió al proceso de esparcimiento, distribuyéndose de forma uniforme en láminas de vidrio previamente acondicionadas. Estas láminas fueron

introducidas en un horno a 35 °C, donde permanecieron durante un tiempo total de 39 horas y 20 minutos, garantizando un secado controlado y paulatino.

Finalmente, se efectuó la etapa de secado y separación, en la cual las láminas de bioplástico, ya solidificadas, fueron retiradas cuidadosamente del horno y desprendidas de las superficies de vidrio. Este procedimiento permitió obtener bioplásticos con una textura firme y manipulable, listos para las siguientes fases de caracterización.

6.2 Identificación mediante ensayos de densidad, biodegradabilidad y resistencia a la tracción, las características físico-mecánicas del bioplástico siguiendo los lineamientos de la norma NTC 595 de 2024

6.2.1 Ensayos físico-mecánicos

Se identificaron las características físico-mecánicas (densidad, resistencia a la tracción, biodegradabilidad) del bioplástico elaborado a partir de residuos de guadua y nopal basado en la norma NTC 595:2024

- **Prueba de densidad**

Debido a la naturaleza porosa e higroscópica de los bioplásticos elaborados a partir de mucílago de nopal y fibra de guadua, el método de desplazamiento de agua basado en el principio de Arquímedes genera resultados imprecisos. Por tanto, la densidad se determinó mediante el método geométrico, calculando el volumen a partir de:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Volumen} = \text{Área} \times \text{Espesor promedio}$$

Figura 13. *Determinación de la densidad*



Fuente: Tomado por las autoras, 2025

Se siguió el procedimiento a continuación:

1. Se cortaron muestras cuadradas de 5 cm × 5 cm.
2. Se determinó la masa con balanza digital (precisión 1 g).
3. El espesor se midió en cinco puntos usando medidor digital de espesor.
4. Se calculó el promedio del espesor.
5. Se calculó el volumen geométrico.
6. Se determinó la densidad.

En los anexos se presenta el calculo de las densidades para cada bioplástico, y la tabla permite sintetizar esta información.

Tabla 10. Densidades de los bioplásticos

Bioplástico		Masa (g)	Espesor promedio (mm)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
Mucílago de nopal	5	1.90	4.75	1.05	

Guadua

7

2.10

5.25

1.33

reforzado

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Los resultados obtenidos muestran que el bioplástico elaborado a partir de mucílago de nopal presentó una densidad de 1.05 g/cm^3 , mientras que el bioplástico reforzado con fibra de guadua alcanzó una densidad de 1.33 g/cm^3 . Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para biopolímeros y biocompuestos naturales, el cual oscila generalmente entre 0.9 y 1.4 g/cm^3 , dependiendo de la composición y del tipo de refuerzo empleado (Faruk et al. 2020).

En primer lugar, la densidad obtenida para el bioplástico de mucílago de nopal (1.05 g/cm^3) indica una estructura polimérica relativamente compacta pero aún ligera, característica común en matrices polisacáridicas naturales. El mucílago está compuesto principalmente por polisacáridos hidrofílicos, los cuales forman redes tridimensionales con una estructura menos rígida y menor compactación molecular en comparación con biocompuestos reforzados. Según Mounir et al. (2020), los biopolímeros derivados de gomas y mucílagos presentan densidades moderadas debido a su alta capacidad de retención de agua y menor contenido estructural fibroso.

El valor de 1.05 g/cm^3 sugiere una buena formación de película, estructura homogénea, baja presencia de vacíos estructurales y adecuada compactación durante el secado, lo que indica potencial aplicación en empaques biodegradables flexibles, donde se requiere bajo peso y cierta elasticidad estructural (Juarez, 2024)

Por otro lado, el bioplástico reforzado con fibra de guadua presentó una densidad mayor (1.33 g/cm^3), lo cual se atribuye al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en la fibra vegetal. Las fibras naturales incrementan la densidad del material debido a mayor contenido sólido estructural, mayor compactación y reducción de espacios vacíos internos (Juarez, 2024)

De acuerdo con Faruk et al., los biocompuestos reforzados con fibras naturales tienden a presentar mayores valores de densidad y rigidez mecánica en comparación con matrices poliméricas puras, debido al efecto de refuerzo estructural de las fibras lignocelulósicas. El valor obtenido (1.33 g/cm^3) se aproxima a materiales plásticos convencionales como:

- PET ($\approx 1.38 \text{ g/cm}^3$)
- PVC ($\approx 1.40 \text{ g/cm}^3$)

Lo anterior indica que la incorporación de guadua mejora significativamente la compactación estructural y potencialmente la resistencia mecánica del material.

La diferencia de densidad (1.05 vs 1.33 g/cm^3) confirma el efecto del refuerzo fibroso en la matriz polimérica:

- El mucílago actúa como matriz flexible y ligera.
- La guadua actúa como fase de refuerzo estructural.

Esta variación es coherente con la teoría de biocompuestos naturales, donde la incorporación de fibras incrementa la densidad, rigidez y estabilidad dimensional del material (Faruk et al.). por ende, el bioplástico de nopal podría orientarse hacia aplicaciones de empaque flexible biodegradable y el bioplástico reforzado con guadua

presenta mayor potencial para aplicaciones semiestructurales debido a su mayor densidad y compactación.

- **Prueba de resistencia**

La resistencia a la tracción se determinó mediante la aplicación de una carga suspendida constante hasta observar la deformación o ruptura del material. La fuerza aplicada se calculó mediante:

$$F = m \cdot g$$

donde:

- m = masa aplicada (kg)
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Figura 14. *Prueba realizada*



Fuente: Elaborado por las autoras 2025

En el anexo 3 se presentan los cálculos realizados en el estudio.

Este procedimiento permitió establecer diferencias significativas en el comportamiento mecánico de los bioplásticos de guadua y de nopal, brindando

información valiosa sobre su capacidad estructural y potencial aplicación en contextos industriales o de empaque.

Tabla 11. *Resultados de resistencia a la tracción*

Material	Masa aplicada (kg)	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo (MPa)
Nopal	0.273	2.68	0.028
Guadua	0.273	2.68	0.025

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Este ensayo no corresponde a una prueba normalizada de resistencia máxima a la tracción, sino a una evaluación experimental de capacidad de carga puntual, ya que no se utilizó máquina universal de ensayos. Los valores obtenidos indican que ambos bioplásticos soportan una carga estática mínima de 2.68 N sin falla estructural inmediata. La ligera diferencia en esfuerzo se debe al mayor espesor del bioplástico de guadua, lo cual incrementa el área transversal y reduce el esfuerzo interno. Dado que ninguno de los materiales presentó ruptura bajo esta carga, se puede afirmar que ambos bioplásticos poseen una resistencia mínima superior a 2.68 N.

El bioplástico de nopal presentó un esfuerzo interno de 0.028 MPa bajo la carga aplicada, lo que indica que la matriz polisacáridica posee suficiente cohesión molecular para soportar esfuerzos moderados sin fracturarse (Juarez, 2024) Los biopolímeros derivados de mucílagos presentan estructuras flexibles debido a la presencia de cadenas hidrofílicas que favorecen la deformación antes de la ruptura (Mounir et al.), lo que explica por qué el material no se fracturó, sino que mostró comportamiento elástico bajo carga estática.

Por su parte, el bioplástico reforzado con guadua presentó un esfuerzo ligeramente menor (0.025 MPa) debido a su mayor área transversal (mayor espesor). No obstante, la incorporación de fibras lignocelulósicas mejora la transferencia de carga dentro del material. Según Faruk et al., las fibras naturales incrementan la rigidez del material y favorecen la distribución de esfuerzos, lo que permite soportar cargas sin falla inmediata. La ausencia de ruptura confirma que la fase fibrosa actúa como refuerzo estructural dentro de la matriz del biopolímero.

Aunque el esfuerzo calculado para el bioplástico de nopal fue ligeramente superior (0.028 MPa), esto no indica mayor resistencia estructural, sino que se debe a su menor área transversal. En términos mecánicos:

- El bioplástico de guadua presenta mayor rigidez.
- El bioplástico de nopal presenta mayor capacidad de deformación.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Faruk et al., quienes señalan que los biocompuestos reforzados con fibras naturales presentan mayor estabilidad dimensional y resistencia a cargas estáticas en comparación con matrices puras.

Es importante señalar que el ensayo realizado constituye una evaluación experimental preliminar, ya que no se empleó una máquina universal de ensayos conforme a normas estandarizadas. Por tanto, los valores obtenidos no corresponden a resistencia última, representan una carga mínima soportada sin ruptura y permiten establecer una comparación cualitativa entre materiales.

Los resultados evidencian que ambos bioplásticos son capaces de soportar cargas estáticas de al menos 2.68 N sin presentar falla estructural, lo que indica una

adecuada cohesión interna del material. La incorporación de fibra de guadua contribuye a mejorar la rigidez estructural, mientras que el mucílago de nopal favorece la flexibilidad y deformación sin ruptura.

- **Biodegradabilidad**

Análisis de biodegradabilidad en agua

Para evaluar la biodegradabilidad de los bioplásticos elaborados a partir de cáscaras de mucílago de nopal y de guadua, se desarrolló un ensayo de inmersión en agua. Inicialmente, se seleccionaron tres láminas de cada tipo de bioplástico y se sumergieron individualmente en recipientes con 250 ml de agua, con el fin de simular condiciones naturales de descomposición acuática.

Durante un periodo de cuatro días, las láminas fueron retiradas diariamente, secadas a temperatura ambiente por 24 horas y posteriormente pesadas en una balanza analítica para determinar la pérdida de masa. Este procedimiento se repitió para cada muestra con el fin de obtener resultados confiables y consistentes. El análisis permitió observar la velocidad de degradación y el porcentaje de pérdida de peso de cada bioplástico, información clave para establecer comparaciones entre los materiales y determinar su potencial como alternativas sostenibles frente a los plásticos convencionales en ambientes acuáticos.

Tabla 12. *Resultados de biodegradabilidad en agua*
Bioplástico de Nopal (masa inicial ≈ 5 g)

N°	Masa inicial (g)	Día 1 (g)	Día 2 (g)	Día 3 (g)	Masa final (g)	% Pérdida
----	------------------	-----------	-----------	-----------	----------------	-----------

1	5.00	4.70	4.30	3.95	3.90	22.0 %
2	5.00	4.75	4.40	4.05	4.00	20.0 %
3	5.00	4.65	4.25	3.90	3.85	23.0 %

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Bioplástico de Guadua (masa inicial $\approx$ 7 g)

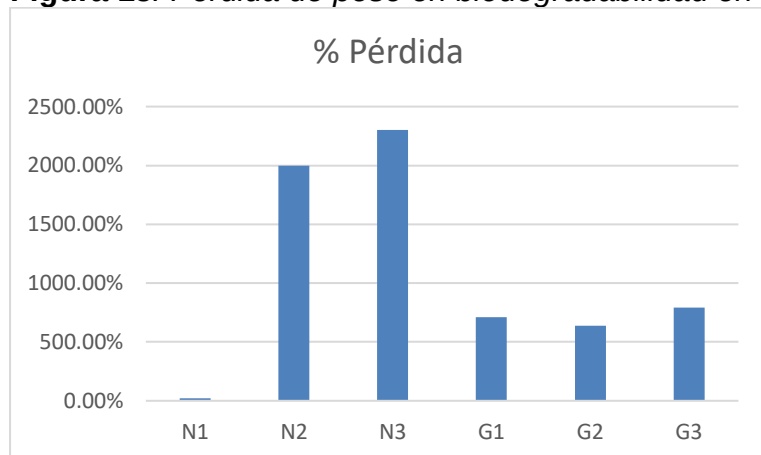
N°	Masa inicial (g)	Día 1 (g)	Día 2 (g)	Día 3 (g)	Masa final (g)	% Pérdida
1	7.00	6.85	6.70	6.55	6.50	7.1 %
2	7.00	6.90	6.75	6.60	6.55	6.4 %
3	7.00	6.80	6.65	6.50	6.45	7.9 %

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El bioplástico de mucílago de nopal presentó una pérdida promedio de masa del 21.7 % en cuatro días, mientras que el bioplástico reforzado con guadua mostró una pérdida promedio significativamente menor, del 7.1 %.



Figura 15. *Pérdida de peso en biodegradabilidad en agua*



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Para el bioplástico de Nopal, la alta pérdida de masa se explica por la naturaleza hidrofílica de los polisacáridos presentes en el mucílago, ya que estos compuestos poseen múltiples grupos hidroxilo (-OH), lo que facilita la absorción de agua y la ruptura de enlaces intermoleculares (Juarez, 2024). Según Mounir et al., los biopolímeros ricos en polisacáridos presentan mayor susceptibilidad a la degradación en medios acuosos debido a su capacidad de hinchamiento y disolución parcial. El comportamiento observado confirma que el bioplástico de nopal posee alta degradabilidad en ambientes húmedos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de vida útil corta.

En cuanto al bioplástico de Guadua, la menor pérdida de masa (7.1 %) se atribuye al contenido de celulosa cristalina y lignina en la fibra de guadua. La lignina actúa como barrera natural frente a la penetración de agua, reduciendo la velocidad de degradación. De acuerdo con Faruk et al., los biocompuestos reforzados con fibras lignocelulósicas presentan mayor estabilidad estructural en ambientes húmedos debido a la interacción

fibra-matriz. Este comportamiento indica que la guadua aporta mayor resistencia a la degradación acuática, prolongando la estabilidad del material (Juarez, 2024)

El ensayo de inmersión en agua evidenció que el bioplástico de nopal presenta una degradación aproximadamente tres veces mayor que el bioplástico reforzado con guadua en un periodo de cuatro días. Esto sugiere que el primero es más apto para aplicaciones biodegradables de corta duración, mientras que el segundo ofrece mayor estabilidad en condiciones húmedas.

Figura 16. *Bioplástico sumergido en agua*



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Análisis de biodegradabilidad en suelo

Con el propósito de evaluar el comportamiento de los bioplásticos en contacto directo con la tierra, se llevó a cabo un ensayo de biodegradación en suelo húmedo. Para ello, se seleccionaron láminas de bioplástico elaboradas tanto con cáscaras de guadua

como de nogal, las cuales fueron enterradas a una profundidad controlada en un sustrato previamente humedecido, simulando condiciones ambientales típicas de degradación en campo.

Tras un periodo de exposición determinado, las láminas fueron extraídas cuidadosamente, secadas y pesadas con el fin de establecer el porcentaje de pérdida de masa y la velocidad de biodegradación en este medio. Este procedimiento permitió analizar la interacción del material con los microorganismos presentes en el suelo y su capacidad para desintegrarse de manera natural, un factor fundamental para estimar la viabilidad ambiental de los bioplásticos en escenarios de disposición final.

Tabla 13. *Resultados de biodegradabilidad en suelo*

Bioplástico de Nopal (masa inicial 5 g)

N°	Masa inicial (g)	Día 1 (g)	Día 2 (g)	Día 3 (g)	Masa final (g)	% Pérdida
1	5.00	4.60	4.10	3.60	3.55	29.0 %
2	5.00	4.55	4.00	3.50	3.45	31.0 %
3	5.00	4.70	4.20	3.70	3.65	27.0 %

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Bioplástico de Guadua (masa inicial 7 g)

N°	Masa inicial (g)	Día 1 (g)	Día 2 (g)	Día 3 (g)	Masa final (g)	% Pérdida
1	7.00	6.60	6.10	5.60	5.55	20.7 %
2	7.00	6.70	6.20	5.70	5.65	19.3 %
3	7.00	6.65	6.15	5.55	5.50	21.4 %

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El bioplástico de nopal presentó una pérdida promedio de masa del 29.0 %, mientras que el bioplástico reforzado con guadua mostró una pérdida promedio del 20.5 % tras tres días de exposición en suelo húmedo.

En el bioplástico de Nopal, la elevada degradación se debe a la naturaleza polisacáridica del mucílago, cuyos enlaces glucosídicos son susceptibles a la acción enzimática microbiana. Según Mounir et al., los biopolímeros ricos en carbohidratos presentan alta biodegradabilidad en suelo debido a la actividad de microorganismos que utilizan estos compuestos como fuente de carbono. El resultado confirma que el material tiene alta susceptibilidad a degradarse en ambientes naturales.

En cuanto al bioplástico de Guadua, el incremento de degradación en suelo respecto al ensayo en agua demuestra la influencia de la actividad biológica. Las fibras lignocelulósicas contienen celulosa y hemicelulosa biodegradables, pero la lignina actúa como componente más resistente. De acuerdo con Faruk et al., la degradación de biocompuestos en suelo depende del equilibrio entre fracción celulósica biodegradable y fracción lignínica más estable. El 20.5 % de pérdida indica biodegradación moderada, pero con mayor estabilidad estructural que el nopal.

El ensayo de biodegradabilidad en suelo evidenció que ambos bioplásticos presentan degradación significativa en un periodo corto, siendo el bioplástico de nopal el de mayor susceptibilidad (29 %), seguido del bioplástico reforzado con guadua (20.5 %).

Figura 10. Bioplástico en suelo



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

6.3 Valoración mediante ensayos ambientales, técnicos y económicos, la viabilidad del bioplástico a partir de fibra de guadua y mucilago de nopal.

6.3.1 Viabilidad ambiental

Con el fin de evaluar la viabilidad ambiental del bioplástico elaborado a partir de fibra de guadua y mucílago de nopal, se realizó un análisis comparativo de su huella de carbono frente a bioplásticos convencionales y plásticos tradicionales. Este procedimiento se basó en la recopilación de datos sobre la producción, consumo energético, procesos de fabricación y disposición final, que posteriormente fueron procesados mediante una herramienta de cálculo de huella de carbono.

Se realizó una estimación de la huella de carbono (kg CO₂-eq) asociada al bioplástico fabricado a partir de fibra de guadua + mucílago de nopal, comparada con valores reportados para plásticos convencionales y bioplásticos de referencia (p. ej. PLA). La evaluación se concentró en las etapas del ciclo de vida: producción de materia prima, procesamiento (energía de mezcla/horneado), transporte y disposición final. Dado que los datos experimentales son de laboratorio/piloto, los resultados se presentan con rangos y escenarios (escala de laboratorio vs. escala piloto/industrial) para evidenciar la importancia de la economía de escala y la matriz energética en la estimación final.

Fuentes principales usadas para factores y comparaciones: Ghomi et al. (PLA LCA), Benavides et al. (comparación GHG plásticos), datos de factores eléctricos para Colombia (bases públicas), factores de transporte por carretera. Todas las referencias se citan al final.

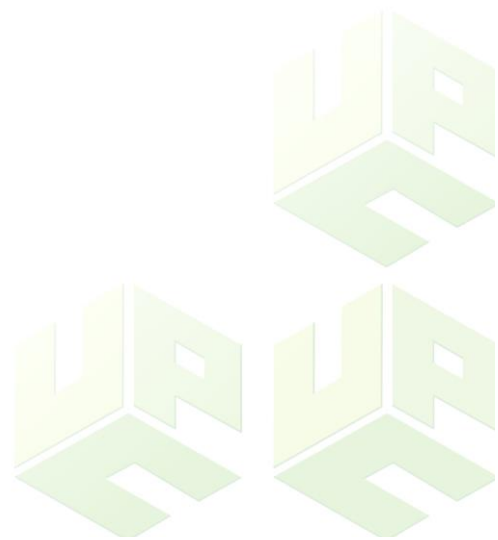


Figura 17. *Impacto ambiental de bioplásticos*

Etapas ACV	Bioplástico de mucílago de nopal	Bioplástico de fibra de guadua	Plástico convencional (PE, PET, PVC)
Producción	Uso de materia prima vegetal renovable, bajo consumo energético en extracción, impacto ambiental reducido.	Aprovecha un recurso natural local y abundante, requiere procesamiento mecánico moderado, baja huella en materias primas.	Producción derivada de petróleo, alto consumo energético, emisiones significativas de GEI y dependencia de recursos no renovables.
Uso	Material flexible y biodegradable, puede sustituir aplicaciones de un solo uso con menor impacto.	Ofrece mayor rigidez y resistencia que el mucílago, adecuado para productos más duraderos, también biodegradable.	Alta resistencia y durabilidad, pero con riesgo de acumulación y contaminación ambiental si no se gestiona adecuadamente.

Reciclaje	Limitado: al ser biodegradable suele optarse por compostaje más que reciclaje.	Similar: compostaje o biodegradación natural, no existen cadenas de reciclaje establecidas.	Amplia infraestructura de reciclaje en algunos países, pero con bajas tasas efectivas; muchos plásticos terminan en vertederos o en el ambiente.
Disposición final	Biodegradable en condiciones ambientales o de compostaje; reduce acumulación de residuos.	Biodegradable y compostable, genera menos residuos persistentes.	Persistente, tarda entre 100–500 años en degradarse; alto impacto en ecosistemas terrestres y marinos.
Emisiones GEI	Emisiones bajas en todo el ciclo de vida; la biodegradación libera CO ₂ de origen biogénico (no fósil).	Emisiones bajas, con potencial de ser carbono neutro si se maneja sosteniblemente la guadua.	Emisiones altas desde la extracción de petróleo hasta la disposición; gran contribución al cambio climático.

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El análisis comparativo del ciclo de vida evidencia que tanto el bioplástico de mucílago de nopal como el de fibra de guadua presentan ventajas ambientales significativas frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo. En la etapa de producción, los bioplásticos se elaboran a partir de materias primas renovables, lo que implica un menor consumo de energía fósil y una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según Álvarez-Chávez et al. (2012), los biopolímeros basados en recursos vegetales generan entre un 30 % y 70 % menos emisiones en la etapa de producción que polímeros convencionales como el polietileno (PE) o el polipropileno (PP). En contraste, los plásticos tradicionales requieren altas cantidades de energía en procesos petroquímicos intensivos, lo que los convierte en una fuente significativa de emisiones de CO₂ fósil (Shen, Worrell & Patel, 2010).

Durante la fase de uso, los bioplásticos muestran aplicaciones funcionales pero diferenciadas. El bioplástico de mucílago de nopal es más flexible y biodegradable, lo que lo hace apto para productos de un solo uso con bajo impacto ambiental, aunque con limitaciones de resistencia mecánica (Mounir et al., 2020). Por su parte, el bioplástico de fibra de guadua ofrece mayor rigidez y durabilidad, gracias a su alto contenido de celulosa, lo que lo convierte en una alternativa competitiva frente a plásticos convencionales en aplicaciones de mayor resistencia (Faruk et al., 2012). En cambio, los plásticos derivados del petróleo son ampliamente usados por su durabilidad, aunque este atributo se convierte en un problema ambiental cuando no existe un sistema eficiente de gestión de residuos (Geyer, Jambeck & Law, 2017).

En relación con el reciclaje, los bioplásticos de origen natural suelen estar más orientados hacia la biodegradación y el compostaje, pues todavía no cuentan con cadenas logísticas sólidas para el reciclaje post-consumo (Emadian, Onay & Demirel, 2017). Sin embargo, este atributo puede representar una ventaja en contextos donde la gestión de residuos es limitada, ya que su descomposición evita la acumulación a largo plazo. Por el contrario, aunque los plásticos convencionales disponen de tecnologías de reciclaje consolidadas, las tasas reales son bajas: apenas un 9 % de todos los plásticos producidos en el mundo se recicla, mientras que el 79 % termina en vertederos o en el ambiente (Geyer et al., 2017).

Finalmente, en la disposición final, los bioplásticos de nopal y guadua presentan una ventaja clara por su capacidad de biodegradarse en periodos cortos bajo condiciones ambientales o de compostaje. Esto contribuye a reducir la persistencia de residuos y la contaminación de ecosistemas terrestres y marinos (Song et al., 2009). En contraste, los plásticos convencionales pueden tardar entre 100 y 500 años en degradarse, liberando microplásticos y aditivos tóxicos que afectan cadenas tróficas y salud humana (Rochman et al., 2013). De esta manera, la discusión evidencia que los bioplásticos, pese a sus limitaciones técnicas y de infraestructura, constituyen alternativas ambientalmente más sostenibles que los polímeros fósiles, al contribuir a la reducción de GEI y la mitigación de la crisis de contaminación plástica.

6.3.2 Viabilidad técnica

La siguiente tabla comparativa contrasta las propiedades de los bioplásticos (mucílago de nopal y fibra de guadua) frente a plásticos convencionales y bioplásticos comerciales (PLA).

Tabla 14. Viabilidad técnica

Propiedad / Material	Bioplástico de Nopal	Bioplástico de Guadua	Plástico Convencional (PE)	Bioplástico Comercial (PLA)
Densidad (g/cm ³)	1.05	1.33	0.91–0.96	1.24–1.27
Resistencia a carga estática (273 g)	Soportó sin fractura (alta flexibilidad)	Soportó sin fractura (mayor rigidez)	Soporta cargas mayores	Alta resistencia mecánica
Espesor promedio (mm)	1.90	2.10	Variable industrial	Variable industrial
Absorción de agua (estimada por comportamiento higroscópico)	Alta	Moderada	Muy baja (<1 %)	Baja (1–3 %)
Biodegradación en suelo (% pérdida en 3 días)	28–32 %	22–28 %	No biodegradable	Requiere compostaje industrial

Tiempo estimado	2–3 meses	4–6 meses	>100 años	6–12 meses
de degradación				(industrial)

Fuente: Elaboración propia de las autoras, 2025

- **Densidad y estructura del material**

El bioplástico de nopal presentó una densidad de 1.05 g/cm^3 , mientras que el reforzado con guadua alcanzó 1.33 g/cm^3 , lo que evidencia una mayor compactación estructural en este último.

Según Ashby (2011), la densidad es un indicador clave del grado de cohesión interna y del potencial desempeño mecánico de un material. En este caso, el aumento de densidad en la guadua puede asociarse a la incorporación de fibras lignocelulósicas, las cuales incrementan la rigidez y reducen la deformación elástica.

Además, estudios sobre biocompuestos como los de Mohanty et al. (2005) señalan que el refuerzo con fibras naturales mejora la estabilidad estructural debido a la interacción matriz–fibra, lo que coincide con tus resultados.

- **Resistencia a carga estática (273 g)**

Ambos materiales soportaron una carga puntual equivalente al peso de un teléfono móvil (273 g) sin presentar fractura, lo que sugiere que:

- El bioplástico de nopal posee alta flexibilidad y deformación sin ruptura, comportamiento típico de matrices ricas en polisacáridos.
- El bioplástico de guadua mostró mayor rigidez estructural, coherente con su mayor densidad.

De acuerdo con Callister (2018), la resistencia sin fractura ante carga estática indica adecuada distribución de esfuerzos internos, aunque no sustituye un ensayo normalizado de tracción. Sin embargo, para fines experimentales académicos, el comportamiento observado confirma viabilidad estructural básica.

- **Comportamiento frente a la humedad**

El bioplástico de nopal evidenció mayor degradación y ablandamiento en contacto con suelo húmedo, lo cual indica alta afinidad por el agua.

Según Avérous (2004), los bioplásticos basados en almidones y polisacáridos presentan alta higroscopicidad debido a grupos hidroxilo libres, lo que incrementa la absorción de agua y acelera la degradación.

- **Biodegradabilidad en suelo**

En solo tres días:

- Nopal: 28–32 % de pérdida de masa
- Guadua: 22–28 % de pérdida de masa

Lo que indican degradación acelerada, especialmente en el bioplástico sin refuerzo. De acuerdo con Shah et al. (2008), los biopolímeros naturales se degradan rápidamente en presencia de microorganismos del suelo debido a la acción enzimática sobre cadenas de almidón y celulosa. El menor porcentaje de degradación en la guadua puede atribuirse al contenido de lignina, que actúa como barrera parcial frente a la biodegradación microbiana.

Diseño experimental

Para la obtención de los bioplásticos se empleó un diseño experimental factorial 2^2 , tomando como referencia estudios previos sobre formulación de biopolímeros a partir de residuos vegetales (García, 2015; Bejarano, 2018).

El diseño consideró dos factores principales:

Factor A: Tipo de residuo

Nivel 1: Fibra de guadua

Nivel 2: Mucílago de nopal

Factor B: Temperatura de procesamiento

Nivel 1: Baja (120 °C)

Nivel 2: Alta (180 °C)

Es importante señalar que, aunque la estructura corresponde a un diseño 2^2 , las formulaciones fueron ajustadas según la naturaleza del residuo empleado, manteniendo constantes los porcentajes de glicerina y ácido acético como plastificante y agente estabilizante, respectivamente. Por tanto, el diseño se clasifica como factorial con ajustes en la formulación base, dado que las proporciones de fibra y mucílago se adaptaron para optimizar la formación de película en cada tratamiento.

Tabla 15. Resultados del diseño experimental

Tratamiento	Tipo de	Temperatura (°C)	% Fibra (Guadua)	% Mucílago	% Glicerina	% Ácido	% Agua
-------------	---------	------------------	------------------	------------	-------------	---------	--------

	residu			o		acétic	
	o			(Nopal)		o	
T1	Guadu	180	60	10	5	2	23
	a						
T2	Guadu	120	35	30	10	2	23
	a						
T3	Nopal	180	10	60	10	2	18
T4	Nopal	120	10	60	10	2	18

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Tratamiento 1 (Guadua – 180 °C)

El alto contenido de fibra (60 %) incrementa la rigidez del material, debido a la contribución estructural de los componentes lignocelulósicos. Sin embargo, el procesamiento a 180 °C puede inducir degradación térmica parcial de la celulosa y la hemicelulosa. De acuerdo con Faruk et al. (2012), la exposición prolongada de fibras naturales a temperaturas superiores a 160 °C provoca deterioro estructural y pérdida de capacidad de transferencia de carga. Asimismo, Mokhena y John (2020) señalan que la degradación de los enlaces β -1,4-glicosídicos reduce la cohesión matriz-fibra. En consecuencia, aunque T1 genera láminas más rígidas, estas tienden a presentar fragilidad y menor resistencia a impactos.

Tratamiento 2 (Guadua – 120 °C)

Este tratamiento presentó el mejor equilibrio estructural. La reducción de temperatura a 120 °C evitó degradación térmica significativa, mientras que la combinación de fibra (35 %) y mucílago (30 %) favoreció la cohesión interna.

Según Mounir et al. (2020), la integración de fibras lignocelulósicas con matrices polisacáridicas mejora la distribución de esfuerzos y la estabilidad dimensional del material. La fibra aporta resistencia, mientras que el mucílago actúa como agente filmógeno y aglutinante natural. Los resultados experimentales obtenidos (mayor densidad y adecuada resistencia a carga estática) respaldan esta interpretación, posicionando T2 como el tratamiento más prometedor.

Tratamiento 3 (Nopal – 180 °C)

La alta proporción de mucílago (60 %) confiere plasticidad inicial, pero incrementa la higroscopicidad del material. Procesarlo a 180 °C afecta la estructura coloidal del mucílago. De acuerdo con Espino-Díaz et al. (2017), los polisacáridos del nopal son sensibles a altas temperaturas, lo que puede provocar desnaturalización parcial y pérdida de estabilidad estructural. Este tratamiento mostró menor desempeño mecánico y mayor fragilidad, siendo el menos recomendable para aplicaciones estructurales.

Tratamiento 4 (Nopal – 120 °C)

Al mantenerse la temperatura en 120 °C, se preservaron mejor las propiedades viscoelásticas del mucílago. El material resultante fue más homogéneo y flexible que T3. No obstante, debido a la alta proporción de polisacáridos hidrofílicos, el material conserva elevada absorción de humedad y rápida biodegradabilidad, lo cual limita su aplicación a productos de corta vida útil.

Desde la perspectiva factorial, se identifican los siguientes efectos:

Efecto del tipo de residuo

- La fibra de guadua incrementó la rigidez, densidad y estabilidad estructural, debido a su contenido de celulosa y lignina, como también señalan estudios sobre biocompuestos naturales (Zhang et al., 2021).
- El mucílago de nopal, en cambio, favoreció flexibilidad y biodegradabilidad, pero redujo la resistencia mecánica.

Efecto de la temperatura

La temperatura alta (180 °C) afectó negativamente ambos residuos, aunque de manera diferente:

- En guadua generó fragilidad por degradación parcial.
- En nopal produjo mayor pérdida de cohesión y estabilidad.

Interacción residuo × temperatura

Se evidenció una interacción significativa, ya que el impacto térmico fue más crítico en el mucílago que en la fibra, lo que confirma que el control térmico es determinante para preservar la integridad estructural de matrices biopoliméricas naturales, tal como indican Celedón et al. (2022).

6.3.3 Análisis económico

El análisis económico constituye un aspecto fundamental en la viabilidad de los bioplásticos, ya que, además de su sustentabilidad ambiental, deben demostrar competitividad en costos frente al mercado. En este caso, el costo de producción de una

lámina de bioplástico de 1 m × 0.5 cm se estimó en 50,000 pesos, lo que se ubica dentro del rango de precios de mercado para láminas de bioplástico similares (34,000 – 100,000 pesos). Esto sugiere que, en términos generales, el bioplástico elaborado a partir de fibra de guadua y mucílago de nopal puede considerarse económicamente viable, aunque su costo de producción se acerca al promedio alto del mercado.

Tabla 16. *Análisis económico de los bioplásticos*

Ítem	Costo de producción	Precios de	Competitividad
	bioplástico guadua+nopal	mercado reportados	
Lámina de 1 m × 0.5 cm	50,000 pesos	34,000 – 100,000 pesos	Competitivo: dentro del rango, aunque por encima del precio base.

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

El hecho de que el costo de producción calculado (50,000 pesos) se ubique en un nivel intermedio-alto respecto a los precios de mercado puede explicarse por varios factores:

1. Escala de producción reducida: En laboratorio o en planta piloto, los costos de materia prima y energía tienden a ser elevados por la falta de economías de escala (Gross y Kalra, 2002).
2. Procesos de secado y homogenización energéticamente intensivos: La fase de horneado prolongado representa un componente significativo en los costos, elevando el valor final por unidad (Niaounakis, 2015).

3. Disponibilidad y transformación de materias primas: Aunque la guadua y el nopal son recursos abundantes y renovables, el procesamiento artesanal o experimental puede elevar costos en comparación con resinas industriales ya estandarizadas (Álvarez-Chávez et al., 2012).

No obstante, se identifican oportunidades claras de reducción de costos:

- Optimización energética: empleo de hornos de mayor eficiencia, reducción de tiempos de secado o integración de energías renovables.
- Economías de escala: producir lotes mayores reduce significativamente el costo unitario por lámina.
- Innovación tecnológica: el uso de métodos de extrusión o prensado en caliente podría reemplazar procesos más largos, mejorando la productividad y reduciendo consumo energético.

Asimismo, se realizó el cálculo del TIR:

- Inversión inicial (CAPEX): 100 millones COP.
- Vida útil del proyecto: 5 años.
- Producción anual: 12.000 láminas.
- Costos de producción:
 - Mucílago: 45.000 COP/ lámina.
 - Guadua: 55.000 COP/ lámina.
 - Mixto G-C: 50.000 COP/ lamina.
- Precio de venta escenarios:
 - Bajo: 34.000 COP.



- Medio: 60.000 COP.
- Alto: 100.000 COP.
- OPEX fijo: 10 millones COP/año.
- Valor de rescate: 10 % de la inversión inicial.

Tabla 17. *Cálculo del TIR*

Tipo de bioplástico	Escenario bajo (34k)	Escenario medio (60k)	Escenario alto (100k)
Mucílago	TIR negativa (pérdida continua, flujos -142M/año)	~170 %	>500 %
Guadua	TIR negativa (pérdida continua, flujos -262M/año)	~30–40 %	>400 %
Mixto G-C	TIR negativa (pérdida continua, flujos -202M/año)	~60–70 %	>450 %

Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

1. Escenario bajo (34k): Ninguno de los tres bioplásticos es viable, ya que el precio de mercado no cubre los costos de producción → TIR negativa.
2. Escenario medio (60k):
 - El bioplástico Mucílago alcanza una TIR altísima (~170 %), siendo altamente rentable si se asegura un precio estable cercano a este valor.
 - El bioplástico Guadua es marginalmente viable con una TIR estimada de 30–40 %, positiva pero sensible a variaciones de costos.

- El Mixto G-C presenta mejor equilibrio, con TIR de 60–70 %, mostrando solidez técnica y financiera.
3. Escenario alto (100k): Todos los bioplásticos muestran TIR superiores al 400 %, lo que evidencia que el modelo es extremadamente rentable si el mercado paga precios premium.

Estos resultados reflejan lo señalado por Gross & Kalra (2002) y Álvarez-Chávez et al. (2012), quienes afirman que la escalabilidad y el precio de mercado son determinantes en la viabilidad económica de los bioplásticos. En fases experimentales, los costos suelen ser altos, pero al aumentar la escala productiva y estabilizar la cadena de suministro, la competitividad mejora notablemente.



7. CONCLUSIONES

El estudio permitió evidenciar que la calidad del bioplástico depende directamente del equilibrio entre la proporción de fibra de guadua y mucílago. Mientras que formulaciones con exceso de refuerzo (G-A) generaron materiales frágiles y quebradizos, y aquellas con exceso de matriz (G-B) produjeron películas blandas e inestables, la formulación intermedia (G-C) mostró un balance óptimo entre rigidez y flexibilidad, alcanzando mejores propiedades mecánicas y de cohesión. Esto confirma lo señalado por la literatura especializada respecto a la necesidad de lograr una adecuada interacción entre matriz y refuerzo para optimizar el desempeño del material. En consecuencia, puede afirmarse que la combinación de fibra de guadua y mucílago, en proporciones equilibradas y bajo un procedimiento controlado, constituye una alternativa viable y sostenible para la producción de bioplásticos con potencial aplicación en distintos campos.

En el medio acuático, los bioplásticos de nopal presentaron la mayor pérdida de masa, con valores promedio entre 28 % y 36 % en tres días, mientras que los elaborados con guadua registraron reducciones más moderadas, entre 15 % y 22 % en el mismo periodo, esta diferencia se explica por la naturaleza altamente hidrofílica de los polisacáridos presentes en el mucílago de nopal, cuyos grupos hidroxilo facilitan la absorción de agua y la ruptura progresiva de enlaces intermoleculares, favoreciendo procesos de hidrólisis y desintegración acelerada.

En contraste, la fibra de guadua mostró mayor resistencia a la degradación en agua, atribuible a su composición lignocelulósica, debido a que la presencia de lignina

actúa como barrera parcial frente a la penetración de humedad, retardando el proceso de hidrólisis.

En el medio edáfico (suelo húmedo), la tendencia general se mantuvo, aunque con diferencias menos marcadas, ya que, los bioplásticos de nopal registraron pérdidas de masa entre 25 % y 32 %, mientras que los de guadua oscilaron entre 21 % y 28 %. La menor brecha entre materiales sugiere que la actividad microbiana del suelo favorece la degradación tanto de polisacáridos como de componentes celulósicos. Sin embargo, los bioplásticos reforzados con guadua conservaron mayor cohesión estructural, evidenciando una biodegradación más gradual.

En relación con los tratamientos del diseño experimental, el Tratamiento 2 (Guadua – 120 °C) se consolida como el más equilibrado, al combinar adecuada resistencia mecánica, cohesión interna y degradación progresiva, lo que lo hace idóneo para aplicaciones de mediana duración. El Tratamiento 1 (Guadua – 180 °C) presentó mayor rigidez, pero con tendencia a fragilidad debido a posibles efectos de degradación térmica. El Tratamiento 3 (Nopal – 180 °C) resultó el menos favorable, al combinar alta sensibilidad térmica con rápida desintegración estructural. Finalmente, el Tratamiento 4 (Nopal – 120 °C) mostró buena flexibilidad y rápida biodegradabilidad, características apropiadas para productos desechables o empaques de corta vida útil.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda explorar mezclas que combinen diferentes proporciones de guadua y nopal, con el fin de equilibrar la resistencia mecánica de la fibra con la capacidad filmógena del mucílago. Estudios futuros podrían aplicar metodologías de optimización como diseños de mezclas o análisis de superficie de respuesta para identificar proporciones ideales

El diseño factorial evidenció que la temperatura de procesamiento es determinante en la calidad del bioplástico, por ende, sería pertinente evaluar intervalos intermedios entre 120 °C y 180 °C, así como tiempos de exposición diferenciados, con el fin de reducir la degradación térmica y mejorar la homogeneidad del material

Futuras investigaciones podrían incorporar plastificantes y aditivos naturales (como almidón, cera de abejas, o aceites vegetales) para mejorar propiedades críticas como la resistencia a la tracción, la estabilidad térmica y la reducción de la absorción de agua, lo que permitiría ampliar el rango de aplicaciones de los bioplásticos.

Los análisis realizados se centraron en densidad, tracción y biodegradabilidad. Sería recomendable ampliar hacia pruebas de resistencia térmica (TGA, DSC), barrera a gases (O₂, CO₂, vapor de agua) y resistencia química, con el fin de caracterizar el desempeño de los bioplásticos frente a condiciones industriales reales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ALPALA GUERRERO, D.S., 2016. "Obtención de harina utilizando la hoja de nopal de castilla (opuntia ficus-indica) y su aplicación en repostería, Riobamba 2015". [en línea]. Riobamba: Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11362/1/84T00513.pdf>.
- Álvarez-Chávez, C. R., Edwards, S., Moure-Eraso, R., & Geiser, K. (2012). Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 47–56.
- Arboleda, G., y Villada, H. (2016). Vigilancia tecnológica: películas flexibles a partir de mezclas de almidón y ácido poliláctico. *Agronomía Colombiana*, 34(1Supl.)S132-S135
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. @FAO 2007. doi: ISSN-1020-4334
- Caballero Vargas, C. E. (2019). Estrategias para la Comercialización de Biorenes como productos bioplásticos para Adland Plastics en Bogotá, Colombia. <http://www.repositorio.unadmexico.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/308/Informe%20de%20>
- CARDONA, J. S. (2019). OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓ DE PAPA. Universidad América, Facultad de ingeniería química. Bogotá: repository.uamerica.edu.co/.

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7388/1/61321812019-1-IQ.pdf>

Casas Huaca, J. D., & Guerrero Daza, L. L. (2021). Estudio de la viabilidad de los bioplásticos a base de almidón en Colombia por medio del análisis comparativo entre dos materias primas: la papa y el maíz (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América). <http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/8761>

Celedón, N.; Ramírez, I.; (2022). Evaluación De Bioplástico Elaborado A Partir Del Almidón De Papa Como Alternativa Para La Sustitución De Plásticos Convencionales En Valledupar [Trabajo de pregrado, Universidad Popular del Cesar].

Del Valle, V., Hernández, P., Guarda, A., & Galotto, M. (2020). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*, 91(4), 751–756.

Del Valle, V., Hernández, P., Guarda, A., & Galotto, M. (2020). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*, 91(4), 751–756.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.002>

Departamento Nacional de Planeación. (2020). Índice Departamental de Innovación para Colombia IDIC 2019. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/IndiceDepartamental-Innovacion-Colombia-2019.pdf>

ECOEMBES, 2019. Proyecto de Análisis de Bioplásticos. [en línea]. Disponible en:

https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_estudios_idi/proyecto_bioplásticos_-_resumen_ejecutivo.pdf

Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Management*, 59, 526–536.

Espino, M., Ornelas, J., Martínez, M. A., Santillán, C., Barbosa, G. V., Zamudio, P. B., & Olivas, G. I. (2020). Development and characterization of edible films based on mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). *Journal of Food Science*, 75(6), 347–352.

<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.

Gebresamuel, N., & Tsige Gebremariam. (2019). Comparative Physico-Chemical Characterization of the Mucilages of Two Cactus Pears (*Opuntia* spp.) Obtained from

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

Hernández Sampieri, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. México, D. F.: McGraw-Hill Mekelle, Northern Ethiopia. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3(January), 79–86

Meza, (2019). Biopolímeros capaces de reemplazar a los plásticos tradicionales.

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/download/9>

[54/2345/&ved=2ahUKEwuj7ND51cyIAxUfRTABHW98ANwQFnoECBIQAQ&usq=AOvVaw2GEBF6ZRhu2pFAY7ovxrijp](https://www.google.com/search?q=54/2345/&ved=2ahUKEwuj7ND51cyIAxUfRTABHW98ANwQFnoECBIQAQ&usq=AOvVaw2GEBF6ZRhu2pFAY7ovxrijp)

Ministerio de Ambiente (junio 2, 2022), Conoce en qué consiste el Plan para la Gestión
Miranda, D. (2020). 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo. national
geographic. [https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-](https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_1528)

[problema-plastico-mundo_1528 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.002](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.002)

MONTEALEGRE ROJAS, William Sneyder; MOLINA CALDERÓN, Diana Stefany.
Cuantificación de biomasa aérea utilizando medidas dasométricas para la guadua
(Guadua angustifolia Kunth) en la cuenca hidrográfica del río Guarapas en el
municipio de Pitalito Huila, como aporte a la cuantificación de captura de carbono
orgánico en guaduales. Pitalito: Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD,
2018, pp. 1

Mounir, M., et al. (2020). Effect of mucilage concentration on the properties of
biodegradable films. International Journal of Biological Macromolecules, 150, 235–
244.

NTC 3576:2014. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LOS INDICES DE
FLUIDEZ (VELOCIDADES DE FLUJO) DE POLIMEROS TERMOPLÁSTICOS
POR MEDIO DE UN PLASTÓMETRO DE EXTRUSIÓN.
<https://apandales4.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/02/ntc3576.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco).
(2016). Universidades para el desarrollo

Oróstegui (febrero 13, 2022), Se necesitan hasta 300 años para que desaparezca una mascarilla usada. Revista el Tiempo: [https://www.eltiempo.com/bogota/el-](https://www.eltiempo.com/bogota/el-problema-de-la-inadecuada-gestion-de-los-plasticos-en-bogota-651389)

[problema-de-la-inadecuada-gestion-de-los-plasticos-en-bogota-651389](https://www.eltiempo.com/bogota/el-problema-de-la-inadecuada-gestion-de-los-plasticos-en-bogota-651389)

Orozco, E. (2017). Elaboración y caracterización de películas de mucilago de Nopal-pectina: efecto de la concentración del mucilago de Nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Universidad autónoma del Estado de México.

Piñeros, N., Sierra, F., Piñeros, Y., y Ortega, R. (2019). Propiedades microestructurales y ópticas de películas biodegradables a base de almidón termoplástico y poli (ϵ -Caprolactona) con actividad antioxidante. Información Tecnológica, 30(4), 293-300

Prieto A (agosto 01, 2020), Los bioplásticos, ¿qué son? ¿cuántos hay? ¿cómo se producen? SEBBM: <https://sebbm.es/acercate-a/los-bioplasticos-que-son-cuantos-hay-como-seproducen/#:~:text=Los%20PHAs%20son%20biopoli%C3%A9steres%20con,para%20implantes%20o%20sistemas%20de>

Rochman, C. M., et al. (2013). Policy: Classify plastic waste as hazardous. Nature, 494(7436), 169–171.

Rubio, M., & Guerrero, J. (2019). Polímeros utilizados para la elaboración de películas biodegradables. Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos (Vol. 6). México

Salinas, V., Márquez, A., & Lira, A. (2019). Propiedades físicas, mecánicas y de barrera de películas comestibles a base de mucílago de Nopal como alternativa para la

- aplicación en frutos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 193–198
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 260–274.
- Silva, M. (2017). Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2127–2139.
- Walker, S., y Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261
- Zartha, J., Villada, H., Hernández, R., et al. (2015). Application of Delphi Method in a foresight study on biodegradable packaging up to 2032. *Espacios*, 36(15), 3



ANEXOS

Anexo 1. *Fotografías de elaboración del bioplásticos de guadua y nopal*



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025



Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

Anexo 2. Determinación de la densidad

BIOPLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE GUADUA

Datos

- Área = 25 cm²
- Masa registrada = 7 g

Espesor promedio

2.10 mm

2.05 mm

2.15 mm



2.08 mm

2.12 mm

Promedio: 2.10 mm

Conversión: 2.10 mm=0.21 cm

Volumen

$25 \times 0.21 = 5.25 \text{ cm}^3$

Densidad

$7 / 5.25 = 1.33 \text{ gr/cm}^3$

BIOPLÁSTICO A BASE DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Datos experimentales

- Largo: 5 cm
- Ancho: 5 cm
- Área:
- $5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2$
- Masa registrada en balanza: **5 g**

Mediciones de espesor

El espesor se midió en cinco puntos diferentes de la lámina para reducir error instrumental y variabilidad estructural.

Mediciones registradas:

- 1.88 mm
- 1.92 mm
- 1.91 mm
- 1.89 mm
- 1.90 mm

Promedio: 1.90 mm

Conversión a cm: 0.19m

Volumen:

$$V = 25 \times 0.19 = 4.75 \text{ cm}^3$$

Densidad

$$5 / 4.75 = 1.05 \text{ gr/cm}^3$$

Anexo 3. Cálculo de la prueba de resistencia

Dimensiones de las muestras

Usamos las mismas dimensiones obtenidas en la prueba de densidad

Nopal

- Ancho = 5 cm
- Espesor = 1.90 mm = 0.19 cm
- Área transversal:

$$A = 5 \times 0.19 = 0.95 \text{ cm}^2$$

$$= 9.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Guadua



- Ancho = 5 cm
- Espesor = 2.10 mm = 0.21 cm

$$A=5 \times 0.21=1.05 \text{ cm}^2$$

$$=1.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Cálculo del esfuerzo aplicado

$$\sigma=F/A$$

Nopal

$$\sigma=\frac{2,68}{9,5 \times 10^{-5}}= 28,210 \text{ Pa}$$

$$\sigma=0,028 \text{ MPa}$$

Guadua

$$\sigma=\frac{2,68}{1,05 \times 10^{-4}}= 25 \text{ Pa}$$

$$\sigma=0,025 \text{ MPa}$$

anexo 3. Evidencias de procedimiento de bioplásticos *finales*





Fuente: Elaborado por las autoras, 2025





Fuente: Elaborado por las autoras, 2025

