



Extracción de biopolímero del residuo de cáscara de banano (Cavendish valery L.) para síntesis de bioplásticos

Extraction of biopolymer from banana peel residue (Cavendish valery L.) for bioplastic synthesis

 **Yessenia Beatriz Sarango Ortega^{1*}**,  **Viviana Sánchez-Vásquez¹**,
 **José Humberto Vera Rodríguez²**,  **Ericka Paola Poma Cuenca³**

¹Universidad Estatal de Milagro. Cda. Universitaria "Dr. Rómulo Minchala Murillo", km 11/2 vía Milagro - Virgen de Fátima; Milagro, Guayas, Ecuador. 091703.

²Universidad Agraria del Ecuador UAE. Vía Puerto Marítimo - Avenida 25 de Julio y Pío Jaramillo (Campus principal) Guayaquil, Guayas, Ecuador, 091307.

³Universidad Técnica Particular de Loja - San Cayetano Alto, C. París, Loja, Ecuador.

RESUMEN: La investigación actual en ciencia de materiales se centra en el desarrollo de biopolímeros derivados de recursos renovables, con la capacidad de biodegradación los convierte en alternativas sostenibles frente a los polímeros petroquímicos. Estos materiales permiten reducir el impacto ambiental y valorizar los desechos agroindustriales. En este estudio se utilizaron dos matrices primarias: cáscara de banano fresca y almidón puro obtenido de banano verde, elaborándose cinco ensayos experimentales. Ambas materias primas fueron incorporadas en una solución compleja bajo condiciones controladas para inducir la disolución polimérica, regulando parámetros como temperatura, agitación y proporción de componentes. El trabajo tuvo como objetivo desarrollar y optimizar un protocolo eficiente para la extracción y purificación de biopolímeros a partir de residuos de *Musa Cavendish Valery L.* Los resultados demostraron que la naturaleza de la materia prima y el contenido de almidón influyen directamente en la calidad estructural y funcional de los biopolímeros obtenidos. La ejecución rigurosa del protocolo permitió formar membranas estables con características semejantes a un biopolímero para poderlas aplicar en la fabricación de bioplásticos de un solo uso. En conjunto, los hallazgos confirman la viabilidad del aprovechamiento de residuos agroindustriales para producir materiales biodegradables, sostenibles y con alto potencial para sustituir plásticos convencionales derivados de fuentes fósiles.

Palabras clave: Almidón, biodegradable, biodegradabilidad.

ABSTRACT: Current research in materials science focuses on the development of biopolymers derived from renewable resources, whose biodegradability makes them sustainable alternatives to petrochemical polymers. These materials contribute to reducing environmental impact while adding value to agro-industrial waste. In this study, two primary matrices were used: fresh banana peel and pure starch extracted from green banana, through a total of five experimental trials. Both raw materials were incorporated into a complex solution under controlled conditions to induce polymer dissolution, regulating parameters such as temperature, agitation, and component ratios. The objective of this work was to develop and optimize an efficient protocol for the extraction and purification of biopolymers from *Musa Cavendish Valery L.* residues. The results showed that the nature of the raw material and the starch content directly influence the structural and functional quality of the biopolymers obtained. The rigorous execution of the protocol led to the formation of stable membranes with characteristics comparable to those of biopolymers, making them suitable for application in the manufacture of single-use bioplastics. Overall, the findings confirm the feasibility of utilizing agro-industrial residues to produce biodegradable, sustainable materials with strong potential to replace conventional plastics derived from fossil sources

Key words: Starch, biodegradable, natural polymer.

*Autor para correspondencia: ysarangoo@unemi.edu.ec

Recibido: 21/08/2025

Aceptado: 24/11/2025

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega, Viviana Sánchez-Vásquez. **Investigación:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega, Viviana Sánchez-Vásquez, Ericka Paola Poma Cuenca. **Supervisión:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega, Ericka Paola Poma Cuenca. **Escríptura del Borrador:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega, Viviana Sánchez-Vásquez, Ericka Paola Poma Cuenca. **Escríptura y edición final:** José Humberto Vera Rodríguez. **Curación de datos:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

La producción de desechos, originada por la actividad humana, se caracteriza por ser una masa heterogénea cuya reintroducción efectiva en los ciclos naturales es un desafío clave, resultando en una acumulación ambiental progresiva (1). Esta acumulación representa una preocupación ambiental amplia, ya que la tasa de generación y la complejidad química de los residuos obstaculizan su descomposición natural (2). Con el tiempo, esto impone una carga considerable sobre los recursos no renovables, lo que demanda el desarrollo de estrategias de estudio y manejo adecuadas para preservar la calidad ambiental y la salud pública (1).

Al clasificar los residuos por origen, se destaca la considerable producción proveniente del sector primario (agricultura y ganadería) (3). Aunque estos desechos son predominantemente orgánicos (aproximadamente 60 %) y son inherentemente biodegradables, su alta concentración en zonas localizadas puede acelerar los procesos de contaminación y requerir un mayor tiempo para su descomposición completa (4).

El cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) desempeña un rol económico vital en las áreas tropicales y subtropicales. La escala de su producción global, particularmente en contextos como el ecuatoriano, resulta en la generación de grandes volúmenes de biomasa residual durante el procesamiento del fruto (5). A pesar del valor comercial del banano, el subproducto más abundante generado es la cáscara, constituyendo cerca del 95% del material no aprovechado. Esta cifra resalta la ineficiencia en el uso de la materia prima, que prioriza casi exclusivamente el consumo humano, lo que inevitablemente contribuye a la creciente cantidad de residuos agroindustriales sin gestión adecuada (6).

La cáscara de banano es, biológicamente, una rica matriz de macromoléculas. Su composición estructural incluye celulosa (25 %), hemicelulosa (15 %) y lignina (60 %) (7). Además, cuando está verde, presenta una elevada concentración de almidón, posicionándola como una fuente excelente y subutilizada para la extracción de biopolímeros, los cuales serán empleados posteriormente en la fabricación de materiales plásticos biodegradables (8).

Los biopolímeros, sintetizados a partir de recursos naturales renovables, ofrecen una alternativa sostenible, pues sus propiedades fisicoquímicas y termoplásticas son comparables a las de los polímeros petroquímicos, pero con el beneficio adicional de ser inherentemente biodegradables (2). Específicamente, la extracción de biopolímeros (como el almidón) a partir de desechos agroindustriales es una estrategia clave que busca revalorizar estos subproductos para la fabricación de dichos materiales. Estos materiales sirven esencialmente para sustituir los plásticos convencionales no degradables en diversas aplicaciones, contribuyendo a mitigar las emisiones de CO₂ (9).

Su aplicación resulta particularmente crítica en el desarrollo de materiales de alto consumo y vida útil corta, tales como envases y utensilios de un solo uso.

Al ser biodegradables, estos biopolímeros aseguran que dichos utensilios no persistan tras su descarte, reintroduciéndose en los ciclos naturales sin la acumulación ambiental característica de los plásticos derivados del petróleo (1).

Por tanto, el objetivo es estandarizar un protocolo de extracción de biopolímeros a partir de diferentes variedades y estados de madurez de cáscara de banano (*Musa paradisiaca* L.) para evaluar su rendimiento y potencial aplicación en el desarrollo de materiales biodegradables, tales como envases y utensilios de un solo uso, utilizando como fuente biomasa residual descartada en fincas bananeras por criterios de calidad o madurez.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental

El proceso de extracción de biopolímeros se realizó a partir de diferentes variedades y estados de madurez de la cáscara de banano. Se implementó esta variación experimental con el fin de determinar la fuente de biomasa que presenta características ópticas idóneas para la aplicación deseada, ya que la composición macromolecular del almidón y de las fibras puede variar significativamente entre los distintos tipos de material. La materia prima para los diferentes ensayos fue obtenida directamente de descartes agroindustriales en fincas bananeras locales (específicamente, biomasa no apta para la comercialización o exportación debido a su avanzado grado de madurez o la presencia de defectos superficiales). La extracción se realizó aplicando variaciones en los parámetros de formulación, temperatura y agitación según el tipo de ensayo. En todos los casos, se utilizó metabisulfito de sodio (Na₂S₂O₅) como agente antioxidante para prevenir la oxidación de los compuestos naturales presentes en la biomasa. Cabe destacar que cada ensayo se realizó de manera independiente y en días distintos, con el fin de asegurar condiciones controladas y evitar interferencias entre los procedimientos.

Ensayo 1: Cáscara seca

Las cáscaras de banano fueron lavadas con agua destilada y tratadas con 2,04 g de metabisulfito de sodio. Tras el secado y trituración, se obtuvo una muestra en polvo homogeneizada por cuarteo. La biomasa se sometió a cocción húmeda con agua destilada hasta el punto de ebullición para facilitar la liberación de los componentes estructurales, y luego se secó en horno durante 24 horas. Posteriormente, la muestra fue triturada nuevamente hasta obtener un polvo fino.

Para la formulación del biopolímero, se emplearon 50 g de biomasa seca, 50 mL de glicerina pura, 50 mL de vinagre al 100 % y 50 mL de agua destilada. La mezcla se agitó y calentó a 60 °C, y posteriormente se secó a la misma temperatura para eliminar la humedad y formar el film biopolimérico.

Ensayo 2: Cáscara fresca (cáscara y endocarpio)

Se utilizó cáscara de banano maduro con endocarpio, la cual fue lavada con agua destilada e inmersa en una solución de metabisulfito de sodio en ebullición durante 30 minutos para inhibir la actividad enzimática. Luego se realizó un secado parcial y la muestra fue licuada hasta obtener una pasta homogénea.

De esta pasta se tomaron 25 mL, que se mezclaron con 3 mL de ácido clorhídrico (HCl) 0,1 M, 3 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 M y 2 mL de glicerol puro al 100 %. La mezcla se vertió en una caja Petri y se secó en estufa a 103 °C durante 30 minutos, favoreciendo la eliminación de humedad y la formación del film biopolimérico.

Ensayo 3: Cáscara fresca - solo endocarpio

Se empleó cáscara de banano maduro, la cual fue lavada, separada del fruto y raspada para obtener el endocarpio. Este se colocó en agua destilada con metabisulfito de sodio y se secó en estufa durante 24 horas. El resto de la cáscara se licuó y secó siguiendo el mismo procedimiento.

Una vez seco, el material fue triturado y tamizado hasta obtener una muestra homogénea. De esta se utilizaron 10 g de biomasa en polvo, 60 mL de agua destilada, 5 mL de glicerina pura y 5 mL de vinagre al 100 %. La mezcla fue agitada a 800 rpm y 100 °C en una plancha agitadora, y posteriormente secada en estufa a 45 °C para obtener el film (10).

Ensayo 4: Cáscara fresca - sin endocarpio

En este ensayo se aplicó el mismo pretratamiento descrito en el caso anterior, pero utilizando cáscara sin endocarpio. Se emplearon 5 g de muestra, 20 mL de agua destilada, 2.5 mL de glicerina pura y 2.5 mL de vinagre al 100 %.

La mezcla se agitó a 800 rpm y 30 °C (temperatura corregida) en una plancha agitadora. Finalmente, se vertió en una caja Petri acondicionada y se secó en estufa a 45 °C bajo condiciones controladas, obteniéndose el biopolímero.

Ensayo 5: Banana verde (almidón)

Se empleó banana verde, el cual fue lavado, pelado y sumergido en agua destilada con metabisulfito de sodio para evitar la oxidación. Las cáscaras se licuaron, tamizaron y lavaron tres veces, y los líquidos de lavado se dejaron en reposo durante dos días, permitiendo la precipitación del almidón.

El almidón extraído se utilizó como base del biopolímero, combinando 2 g de almidón, 2 mL de glicerina pura, 2 mL de vinagre al 100 % y 15 mL de agua destilada. La mezcla se sometió a agitación constante de 500 rpm a 200 °C en plancha agitadora, y luego se secó en estufa a 45 °C, obteniéndose una película biopolimérica uniforme.

Evaluación de transparencia y biodegradabilidad de los biopolímeros

Los tratamientos fueron seleccionados para la evaluación de transparencia y biodegradabilidad.

Transparencia

Para la evaluación del grado de transparencia de los biopolímeros, las muestras fueron seccionadas en filmes de 2,5 cm × 1 cm, obteniéndose cinco réplicas por cada ensayo. Cada filme fue analizado microscópicamente mediante tres observaciones en distintas áreas de la superficie, con el fin de determinar la homogeneidad óptica del material. La transparencia se calificó utilizando una escala de Likert, donde: 1 (totalmente opaco), 2 (ligeramente opaco), 3 (semitransparente), 4 (transparente) y 5 (totalmente transparente) (11).

Biodegradabilidad

Para evaluar la degradación foto-inducida de los biopolímeros, las muestras fueron expuestas a radiación ultravioleta (UV) a una longitud de onda de 365 nm durante un periodo de seis días. Se registró el peso inicial y final de cada muestra con el fin de determinar la variación mísica asociada al proceso de degradación (12).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante el software SPSS, versión 27. La comparación de las variables Transparencia (Likert) y Pérdida de Peso (Biodegradabilidad) entre los cinco ensayos independientes se efectuó con la prueba Kruskal-Wallis. Las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) fueron posteriormente evaluadas mediante comparaciones por pares con la corrección de Bonferroni, con el fin de determinar el protocolo óptimo en términos de propiedades ópticas y degradación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se implementaron cinco ensayos experimentales con el objetivo de establecer un protocolo de extracción de biopolímeros a partir de diferentes estados de la cáscara de banano (verde y maduro).

Respecto a los resultados obtenidos en el ensayo 1, el tratamiento con cáscara de banano seca resultó en la obtención de un material sólido de color negro que, al manipularse, se desmoronaba fácilmente y no presentó la cohesión necesaria para formar un film. Este material exhibía una apariencia no heterogénea y una superficie agrietada. Este resultado demuestra que la cáscara de banano seca, bajo las condiciones ensayadas, no es viable como fuente directa para la fabricación de materiales biodegradables de un solo uso que requieren integridad estructural y capacidad de formación de película (Figura 1).

En el Ensayo 2, donde se empleó cáscara de banano maduro con endocarpio, el proceso resultó en una pasta no homogénea de color amarillo, con una textura viscosa y pegajosa. Esta mezcla se extendió sin formar una capa uniforme en la caja Petri y, tras el secado, el material no consolidó una estructura de film, manteniéndose en una forma no uniforme. Esta condición experimental reveló dos limitaciones críticas: primero, el material no desarrolló la cohesión e integridad estructural necesaria para formar una película; y segundo, el color amarillo evidencia concentración



Figura 1. Extracción del biopolímero con cáscara de banano seco.

de pigmentos inherentes a la cáscara madura, lo cual reduce significativamente la transparencia y la calidad óptica del biopolímero (**Figura 2**).

El ensayo 3, que utilizó biomasa obtenida a partir de endocarpio fresco, mostró resultados distintos. Tras la formulación y el secado, se obtuvo un film de color amarillo anaranjado pálido. Este material presentó una superficie lisa y relativamente uniforme, con una formación de película visible y una cohesión considerable, aunque con algunas imperfecciones menores en su superficie. El material obtenido permitió su manipulación como una película (**Figura 3**).

En el cuarto ensayo, donde se utilizó cáscara fresca sin endocarpio, se logró la obtención de un film biopolimérico de color amarillo opaco, con una superficie notablemente más lisa y una uniformidad superior en comparación con los ensayos anteriores. Este film se desprendió de la caja Petri como una película continua y bien formada (**Figura 4**).

El último ensayo, basado en la extracción y uso del almidón precipitado de banano verde, fue el que arrojó los mejores resultados en la formación de la película. Se obtuvo un film biopolimérico transparente de tonalidad amarillo muy pálido, con una superficie muy lisa que exhiben la mayor uniformidad óptica y la mejor calidad estructural, asemejándose a un material de empaque (**Figura 5**).

Los resultados obtenidos en la evaluación de la transparencia evidenciaron diferencias notables entre los cinco ensayos realizados, las cuales se relacionan



Figura 3. Biopolímero con endocarpio de banano



Figura 4. Extracción del polímero con cáscara de banano fresco solamente con endocarpio sin cáscara



Figura 5. Biopolímeros de almidón de cáscara de banano verde



Figura 2. Extracción del biopolímero con cáscara de banano maduro (cascara y endocarpio)

directamente con la naturaleza de la materia prima y el protocolo de extracción aplicado. Los biopolímeros elaborados a partir de biomasa seca (Ensayo 1) fueron clasificados como totalmente opacos (Likert=1). Los obtenidos en los Ensayos 2 y 3 presentaron una apariencia ligeramente opaca (Likert = 2), atribuida a su heterogeneidad y a la coloración marrón o amarillenta observada. Dado que el objetivo del protocolo es obtener materiales adecuados para envases de un solo uso, donde acercarse a la transparencia es un requisito funcional clave para la aceptación comercial y la visibilidad del producto, las condiciones que resultaron en opacidad total o ligera (Ensayos 1, 2 y 3) fueron consideradas inviables para la estandarización.

En cambio, los materiales que lograron formar películas cercanas a la transparencia mostraron una mejora progresiva en sus propiedades ópticas: el film elaborado con cáscara fresca sin endocarpio (Ensayo 4) fue evaluado como semitransparente (Likert = 3), mientras que el obtenido a partir de almidón de banano verde (Ensayo 5) presentó las mejores características de transparencia, siendo calificado como totalmente transparente (Likert = 4).

Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para mostrar las diferencias estadísticamente significativas en los valores de transparencia de los biopolímeros entre los distintos ensayos ($H = 73,000$; $gl = 4$; $p < 0,001$). Estos resultados evidencian variaciones en el grado de transparencia observado según el tipo de ensayo realizado (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de los ensayos mediante la prueba de Kruskal-Wallis

Resumen de prueba	
Kruskal-Wallis de muestras independientes	
N total	74
Estadístico de prueba	73,000 ^a
Grado de libertad	4
Sig. asintótica (prueba bilateral)	< 0,001

* $p < 0,05$ existen diferencias significativas en la transparencia entre los ensayos

La tabla de comparaciones por pares (post-hoc), con significación ajustada mediante la corrección de Bonferroni, reveló diferencias estadísticamente significativas (Sig. ajustada < 0.05) en la transparencia del Ensayo 1 (biomasa seca) al compararse con todos los demás ensayos (E2, E3, E4 y E5). Este resultado confirma estadísticamente que la metodología inicial de cáscara seca produce un material significativamente diferente, el cual, debido a su opacidad total, resulta inviable para el desarrollo del material transparente propuesto en la estandarización del protocolo. Asimismo, tanto el Ensayo 2 como el Ensayo 3 mostraron diferencias significativas con E4 y E5, sugiriendo que la inclusión o exclusión del endocarpio en estos casos aún no optimiza la transparencia. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre el Ensayo 2 y el Ensayo 3 (Sig. ajustada = 1.000)

ni entre los dos ensayos más transparentes, el Ensayo 4 y el Ensayo 5 (Sig. ajustada = 0.572), lo cual implica que las mejoras de transparencia logradas entre E4 y E5 no son estadísticamente distintas (Tabla 2).

La pérdida total de peso (biodegradabilidad) después de 6 días de exposición a rayos UV se comparó entre los cinco ensayos independientes (E1, E2, E3, E4, E5). El análisis global arrojó un resultado estadísticamente significativo de $H (4) = 13.189$, con una significación asintótica de $p < 0.004$. Este resultado indica que existen diferencias significativas en la mediana de la pérdida de peso (biodegradabilidad) entre las condiciones de ensayo aplicadas al biopolímero, mostrando un efecto significativo en la biodegradabilidad del material expuesto a radiación UV (Tabla 3).

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para la Pérdida Total de Peso del Biopolímero

Estadísticos de prueba ^{a,b}	
PERDIDA TOTAL	
H de Kruskal-Wallis	13,189
gl	3
Sig. asin.	0,004

* $p < 0,05$ existen diferencias significativas en la biodegradabilidad entre los ensayos

La serie de ensayos implementados evidenció una correlación directa entre el pretratamiento de la materia prima y las propiedades funcionales del biopolímero final.

La inviabilidad del ensayo 1 (cáscara seca), que solo produjo un residuo sólido, negro y desmoronable, se interpreta como una consecuencia de la degradación térmica o pirólisis sufrida por la biomasa durante el secado y la cocción (13). Este daño estructural es el principal factor que impide la gelatinización completa del almidón y limita la acción plastificante de la glicerina (14, 15), resultando en un material que carece de la integridad estructural necesaria para la formación de film. En cuanto al ensayo 2, la obtención de una pasta viscosa que no consolidó un film funcional, a pesar de haber superado la degradación extrema del ensayo 1, se atribuye a un desbalance en la formulación. Específicamente, la alta proporción de azúcares solubles (16) y el exceso de humedad característicos

Tabla 2. Comparación de los ensayos mediante la prueba de Kruskal-Wallis

Comparaciones por parejas de Ensayo						
Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a	
E1-E2	-22,500	7,492	-3,003	,003	,027	
E1-E3	-22,500	7,492	-3,003	,003	,027	
E1-E4	-45,000	7,492	-6,007	,000	,000	
E1-E5	-59,500	7,624	-7,804	,000	,000	
E2-E3	,000	7,492	,000	1,000	1,000	
E2-E4	-22,500	7,492	-3,003	,003	,027	
E2-E5	-37,000	7,624	-4,853	,000	,000	
E3-E4	-22,500	7,492	-3,003	,003	,027	
E3-E5	-37,000	7,624	-4,853	,000	,000	
E4-E5	-14,500	7,624	-1,902	,057	,572	

El nivel de significación es de ,050

de la cáscara madura pudieron haber actuado como agentes anti-plastificantes, impidiendo la consolidación de una red polimérica estable (17).

Los resultados de los ensayos 3 y 4 representan un avance significativo al lograr la formación de películas manipulables. El éxito estructural alcanzado en el ensayo 3 sugiere que el protocolo de extracción con endocarpio fresco preservó la funcionalidad polimérica de la biomasa. La mejora en la uniformidad observada en el ensayo 4 se debe, probablemente, a que la exclusión del endocarpio y el ajuste de reactivos favorecieron una gelatinización más completa (14), logrando un film continuo y bien formado. Sin embargo, la persistencia de tonalidades amarillentas o anaranjadas en ambos films (E3 y E4) indica que la biomasa de la cáscara, incluso fresca, retiene compuestos cromóforos y pigmentos (18) que actúan como una limitación inherente al potencial óptico de los biopolímeros basados en biomasa integral.

La evaluación de la transparencia y el análisis estadístico confirmaron estas observaciones. El resultado de la prueba de Kruskal-Wallis demostró diferencias significativas entre los ensayos, validando que el protocolo tiene un efecto determinante en las propiedades ópticas (13). El ensayo 5 (almidón purificado) demostró la superioridad óptica, ya que su clasificación como totalmente transparente (Likert = 4) valida que la remoción de pigmentos y lignina es la clave para maximizar la transmisión de luz. Curiosamente, la ausencia de diferencia estadística significativa en la transparencia entre el ensayo 4 y el ensayo 5 (p -ajustada = 0.572) sugiere que la optimización alcanzada en el ensayo 4 ofrece un equilibrio atractivo entre la simplicidad del proceso y propiedades ópticas muy cercanas a las del almidón purificado (18).

Finalmente, en cuanto a la biodegradabilidad, la diferencia significativa en la pérdida de peso por degradación foto-inducida (UV) se explica por una correlación inversa entre pureza y blindaje UV. Los films de mayor pureza de almidón (E5) son inherentemente más susceptibles a la degradación (19) que los ensayos iniciales con alto contenido de compuestos fenólicos y lignina, que actúan como agentes protectores naturales contra la radiación UV (20). Este resultado final confirma que el biopolímero optimizado (E5) posee un carácter altamente degradable, un atributo esencial para su aplicación como material de empaque sostenible.

CONCLUSIONES

- La metodología inicial basada en cáscara seca (ensayo 1) resultó ineficaz, pues el proceso térmico indujo una severa degradación de los polisacáridos que impidió la integridad estructural necesaria para formar un film cohesivo. En contraste, la exclusión del endocarpio y el ajuste de reactivos (ensayo 4) representaron la optimización estructural clave, permitiendo la completa gelatinización del almidón y la obtención de un film continuo.
- Se concluye que el ensayo 4 (cáscara fresca sin endocarpio) es el método estandarizado más eficiente. Aunque el almidón purificado (ensayo 5) logró la máxima clasificación óptica, el análisis estadístico *post-hoc* demostró que no existe una diferencia significativa en la transparencia entre E4 y E5 ($Sig. ajustada = 0.572$).

Por lo tanto, el ensayo 4 ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia operativa y simplicidad del proceso para obtener biopolímeros aptos para envases.

- El análisis de degradación foto-inducida (UV) confirmó la viabilidad tecnológica del material. El biopolímero optimizado (E5) demostró ser altamente degradable ($H(4) = 13.189$; $p < 0.004$), lo que valida la utilidad del almidón de banano verde como materia prima para aplicaciones de empaque biodegradable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Torres Rondon ML, López Ortiz DM. Biopolymers: development and innovations in sustainable materials science. *Revista Ciencia Ambiente y Clima* [Internet]. 2025 Jan [cited 2025 Oct 18];7(2). Available from: <https://revistas.intec.edu.do/index.php/cienacl/article/view/3341/3934>
2. Rodríguez Sandoval P, Arévalo MI. Los materiales biodegradables, una alternativa a la contaminación de los polímeros sintéticos. *Revista de la Escuela de Ingenierías y Tecnologías Unimonserrate* [Internet]. 2021 Feb 18 [cited 2025 Nov 3];(1):29-37. Available from: DOI: <http://doi.org/10.29151/reit.n1a3>
3. Vroman I, Tighzert L. Biodegradable polymers. *Materials* [Internet]. 2009 Mar 30 [cited 2025 Nov 3];2(2):307-44. Available from: DOI: <http://doi.org/10.3390/ma2020307>
4. Hernández Silva ML, Guzmán Martínez B. Biopolymers used in the manufacture of food packaging. *Revista Publicaciones e investigación* [Internet]. 2009 Aug 19 [cited 2025 Oct 17];3(1900-6608):1900-6608. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8660003>
5. Mata Anchundia D, Suatunce Cunuhay JP, Poveda Morán R. Análisis económico del banano orgánico y convencional en la provincia Los Ríos, Ecuador. *Revista IDICT* [Internet]. 2021 Jul 14 [cited 2025 Oct 18];23:419-30. Available from: <https://www.redalyc.org/journal/6378/637869393005/html/>
6. Riera MA, Palma R. Obtención de bioplásticos a partir de desechos agrícolas. Una revisión de las potencialidades en Ecuador. *Journal Redalyc* [Internet]. 2018 Nov 22 [cited 2025 Oct 17];13:69-78. Available from: <https://www.redalyc.org/journal/933/93368279005/html/>
7. Montoya López J, Castaño Víctor DQ, Lucas Aguirre JC. Caracterización de harina y almidón de frutos de banano Gros Michel (*Musa acuminata* AAA). *Acta Agron* [Internet]. 2015 Mar 1 [cited 2025 Oct 18];64(1):11-21. Available from: DOI: <http://doi.org/10.15446/acag.v64n1.38814>
8. Lucas JC, Dumar Quintero V, Andrés C, Valencia C. Characterization of flour and starch from guineo plantain AAAea (*Musa sapientum* L.). *Revista Agroindustria* [Internet]. 2013 Nov 9 [cited 2025 Oct 18];2(62):83-96. Available from: <http://www.science.org.co/pdf/acag/v62n2/v62n2a01.pdf>
9. Hisham F, Maziati Akmal MH, Ahmad F, Ahmad K, Samat N. Biopolymer chitosan: Potential sources, extraction methods, and emerging applications. *Ain Shams Engineering Journal* [Internet]. 2024 Aug 17 [cited 2025 Nov 2];15(2):2090-4479. Available from: DOI: <http://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102424>

10. Castillo R, Escobar E, Fernández D, Gutiérrez R, Morcillo J, Núñez N, et al. Bioplástico a base de la cáscara del plátano bioplástico made from banana peel resumen. Revista de Iniciación Científica [Internet]. 2015 Aug [cited 2025 Nov 2];1. Available from: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/346/339>
11. Matas A. Diseño del formato de escalas tipo Likert: Un estado de la cuestión. Revista Electrónica de Investigación Educativa [Internet]. 2018 [cited 2025 Nov 2];20(1):38-47. Available from: DOI: <http://doi.org/10.24320/redie.2018.20.1.1347>
12. San Andrés M, Chércoles R, De la Roja J, Gómez M. Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados. Factores responsables de la Restauración [Internet]. 2006 [cited 2025 Nov 2];283-307. Available from: <https://www.cultura.gob.es/dam/jcr:d7cb6b8e-3c5f-41d4-8726-6894ea9ea575/factrespxir-einasof.pdf>
13. Wohlt D, Kellner V, Kolesnik D, Bader-Mittermaier S, Schieber A. Thermal stabilization of banana peels for the preparation of soluble and insoluble dietary fiber. Future Foods [Internet]. 2025 Jun 1 [cited 2025 Nov 3];11. Available from: DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100631>
14. Ramos- García M de L, Romero- Bastida C, Bautista - Baños S. Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas frescas. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha [Internet]. 2018 Jun 30;19. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
15. Lu DR, Xiao CM, Xu SJ. Starch-based completely biodegradable polymer materials. Express Polym Lett [Internet]. 2009 [cited 2025 Nov 3];3(6):366-75. Available from: DOI: <http://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.46>
16. Amado-González E, Villamizar Quiñonez C, Martínez-Reina M. The effect of biomass moisture on heat combustion from sugarcane baggase and waste corn cob. AVANCES Investigación en Ingeniería [Internet]. 2014 Jun 16 [cited 2025 Nov 3];11(1):27. Available from: DOI: <http://doi.org/1794-4953> (2014)
17. Niari SM, Bahri MH, Rashidi M. Effects of coating methods and storage periods on some quality characteristics of carrot during ambient storage. World Appl Sci J [Internet]. 2013 [cited 2025 Nov 3];21(7):1025-31. DOI: <http://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.7.2905>
18. Khacharat L, Mahakarnchanakul W, Sukatta U, Sae-Tan S, Rugthaworn P, Klinsukhon K, et al. Effect of banana peels and phenolic compounds on pigments and citrinin production by *Monascus purpureus*. Agriculture and Natural Resources [Internet]. 2022 Jan 1 [cited 2025 Nov 3];56(1):203-14. Available from: DOI: <http://doi.org/10.34044/j.anres.2021.56.1.19>
19. Singh B, Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. Polym Degrad Stab [Internet]. 2008 Mar [cited 2025 Nov 2];93(3):561-84. Available from: DOI: <http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
20. Afshar S V., Boldrin A, Astrup TF, Daugaard AE, Hartmann NB. Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review. J Clean Prod [Internet]. 2024 Jan 1 [cited 2025 Nov 2];434. Available from: DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140000>