Preparation of Bioplastics from Starches of Black, White, and Red Beans (*Phaseolus vulgaris*)

Juan Jacobo Paredes Heller[1], Dana Elizabeth Lázaro Cárdenas[2], César Eduardo Zuniga Rodriguez[3], Kathya Gissell García Rubio[4]

[1,2,3,4] Universidad Nacional Autónoma de Honduras UNAH, Honduras, juan.paredes@unah.edu.hn, dana.lazaro@unah.hn, czuniga@unah.hn, kggarciar@unah.hn.

Abstract*– Given the need for biodegradable alternatives to conventional plastics, this study explored the use of starch from Phaseolus vulgaris (white, red, and black bean varieties) as a raw material for bioplastic production. The objective was to evaluate the influence of bean type on starch extraction yield and on the physical, chemical, and biodegradability properties of bioplastics synthesized under laboratory conditions in San Pedro Sula, Cortés. Three extractions were performed per variety using 400 g of sample per trial, and each starch batch was used to produce a bioplastic for the analysis of solubility, moisture, density, pH, and biodegradability in an acidic medium over six days. Data were analyzed using ANOVA, Tukey, Grubbs, and Mood's Median tests, showing that bean variety significantly affects the evaluated properties. Black bean starch exhibited the highest yield (17.42 ± 0.88%), the highest density (1.36 ± 0.03 g/mL), the lowest solubility (31.41 ± 1.38%), and the lowest biodegradability (75.45 ± 1.25%), indicating a more compact and stable structure. These findings highlight the potential of black bean starch as a raw material for producing stronger and more durable bioplastics.

Keywords-- ***Starch, Bioplastics, Biodegradation, Beans (Phaseolus vulgaris), Physical properties, Chemical properties.***

Obtención de Bioplásticos a Partir de Almidón de Frijoles Negros, Blancos y Rojos (*Phaseolus vulgaris*)

Juan Jacobo Paredes Heller[1], Dana Elizabeth Lázaro Cárdenas[2], César Eduardo Zuniga Rodriguez[3], Kathya Gissell García Rubio[4]

[1,2,3, 4] Universidad Nacional Autónoma de Honduras UNAH, Honduras, juan.paredes@unah.edu.hn, dana.lazaro@unah.hn, czuniga@unah.hn, kggarciar@unah.hn.

Resumen– ***Dada la necesidad de alternativas biodegradables a los plásticos convencionales, se exploró el uso de almidón de frijol (Phaseolus vulgaris) y sus variedades (blanco, rojo y negro) como materia prima para la elaboración de bioplásticos. Este estudio evaluó la influencia del tipo de frijol sobre el rendimiento de extracción de almidón y sobre las propiedades físicas, químicas y de biodegradabilidad de los bioplásticos sintetizados en condiciones de laboratorio en San Pedro Sula, Cortés. Se realizaron tres extracciones por variedad, utilizando 400g de muestra por ensayo, y a partir de cada lote de almidón se elaboró un bioplástico para analizar la solubilidad, humedad, densidad, pH y biodegradabilidad en medio ácido (6 días). Los datos se analizaron mediante pruebas ANOVA, Tukey, Grubbs y Mood's Median, demostrando que el tipo de frijol afecta significativamente las propiedades evaluadas. El frijol negro presentó el mayor rendimiento (17.42 ± 0.88%), mayor densidad (1.36 ± 0.03 g/mL), menor solubilidad (31.41 ± 1.38%) y menor biodegradabilidad (75.45 ± 1.25%), indicando una estructura más compacta y estable. Esto evidencia el potencial del frijol negro como materia prima para bioplásticos más resistentes y duraderos a biodegradabilidad en medio ácido.***

Palabras clave-- Almidón, Bioplásticos, Biodegradación, Frijoles (Phaseolus vulgaris), Propiedades físicas, Propiedades químicas.

I. Introducción

La contaminación por plásticos constituye uno de los desafíos ambientales más críticos del siglo XXI, debido a su persistencia, acumulación en ecosistemas y efectos sobre la salud humana [1]. Se estima que entre 19 y 23 millones de toneladas de desechos plásticos alcanzan cada año los ecosistemas acuáticos, afectando aguas dulces y marinas [2]. Investigaciones recientes evidencian que microplásticos y nanoplásticos han sido detectados en alimentos, fuentes de agua e incluso en muestras biológicas humanas, lo que intensifica la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles a los polímeros sintéticos [3]. En respuesta a este problema global, los bioplásticos emergen como materiales biodegradables capaces de reducir el impacto ambiental y el consumo de recursos fósiles, especialmente aquellos derivados de matrices poliméricas naturales como el almidón [4].

Dentro de las diversas fuentes vegetales, los almidones provenientes de leguminosas muestran propiedades funcionales prometedoras. Investigaciones recientes señalan que ciertas variedades de *Phaseolus vulgaris* exhiben comportamientos reológicos particulares que influyen en la formación de películas y la calidad de los bioplásticos resultantes [4], [5]. No obstante, la literatura existente suele enfocarse en un único cultivo o proporciona información fragmentada, lo que restringe la comparación del rendimiento y las propiedades de los almidones extraídos de frijol negro, blanco o rojo. Además, escasos estudios progresan hacia la fabricación del bioplástico y la evaluación completa de sus propiedades físicas, químicas y de biodegradabilidad.

En este contexto, la presente investigación se desarrolla para contribuir al vacío de conocimiento sobre el aprovechamiento del almidón de frijoles cultivados y consumidos localmente en Honduras. El estudio se centra en evaluar y comparar el rendimiento de extracción del almidón obtenido de frijoles negros, blancos y rojos, así como las propiedades funcionales de los bioplásticos elaborados bajo condiciones controladas de laboratorio en San Pedro Sula. Considerando que pequeñas variaciones composicionales pueden generar diferencias significativas en densidad, solubilidad, humedad y biodegradabilidad, este análisis resulta esencial para identificar las variedades con mayor potencial como materia prima para la producción de bioplásticos sostenibles.

La investigación se justifica tanto por su relevancia ambiental como por su pertinencia científica e industrial. El uso de materias primas locales puede disminuir costos, fortalecer cadenas agrícolas y promover alternativas de empaque biodegradable adaptadas al contexto hondureño. Además, genera datos empíricos que contribuyen a optimizar formulaciones y procesos, favoreciendo el desarrollo de materiales que reduzcan la dependencia de polímeros derivados del petróleo. Así, el objetivo general del estudio es cuantificar el rendimiento de extracción de almidón de frijoles negros, blancos y rojos para su uso en bioplásticos, complementado con la caracterización y comparación de las propiedades físicas, químicas y de biodegradabilidad de los materiales obtenidos.

II. Marco Referencial

A. Problemática ambiental

Los polímeros sintéticos derivados del petróleo han alcanzado dimensiones críticas a nivel global, siendo catalogada como "polución blanca" debido a su persistencia en ecosistemas terrestres y acuáticos [6]. Los plásticos convencionales requieren entre 100 y 1000 años para su degradación natural, acumulándose en vertederos, océanos y cadenas alimentarias, lo que ha impulsado la búsqueda urgente de alternativas sostenibles y biodegradables [7]. En este contexto, los bioplásticos emergen como una solución prometedora, especialmente aquellos derivados de fuentes renovables como el almidón, que presenta ventajas significativas en términos de disponibilidad, costo y capacidad de biodegradación [8]. Honduras, como país con una

economía agrícola diversificada, posee un potencial considerable para el desarrollo de bioplásticos a partir de recursos locales [9]. El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) constituye uno de los cultivos más importantes del país, con diferentes variedades (negros, blancos y rojos) que se cultivan extensivamente en diversas regiones [10].

La utilización del almidón extraído de estas leguminosas para la producción de bioplásticos representa una oportunidad de valor agregado que podría contribuir tanto a la diversificación productiva como a la mitigación del impacto ambiental de los materiales de empaque. Sin embargo, los bioplásticos basados en almidón presentan limitaciones inherentes que deben ser consideradas, incluyendo su sensibilidad a la humedad, propiedades mecánicas inferiores comparadas con plásticos sintéticos, y variabilidad en sus características según la fuente botánica y métodos de procesamiento [11]. Estas limitaciones han motivado investigaciones extensivas sobre modificaciones físicas y químicas del almidón, así como la optimización de formulaciones mediante la incorporación de plastificantes y otros aditivos para mejorar las propiedades funcionales de los materiales resultantes.

B. Revisión de estudios relevantes

Los primeros estudios sistemáticos sobre bioplásticos de almidón establecieron protocolos fundamentales para la caracterización de materiales biodegradables. El período 2015-2020 marcó un punto de inflexión en la investigación de bioplásticos de almidón, con estudios que establecieron protocolos estandarizados para la síntesis y caracterización de estos materiales. Investigadores desarrollaron metodologías para la síntesis y caracterización de bioplásticos basados en almidón, empleando técnicas de espectroscopía FTIR, análisis térmico y pruebas de biodegradabilidad por enterramiento en suelo [12]. Sus resultados demostraron que las propiedades mecánicas de las películas varían significativamente según el tipo de almidón utilizado y las condiciones de procesamiento.

También se investigó la elaboración de bioplásticos a partir de almidón residual de papa, reportando un 64.2% de biodegradación en compost durante pruebas de laboratorio [13]. Este trabajo estableció protocolos de caracterización que incluyen densidad, solubilidad y contenido de humedad como parámetros fundamentales. La metodología desarrollada demostró la viabilidad técnica de utilizar almidones de diversas fuentes para la producción de materiales biodegradables con propiedades funcionales adecuadas. El primer estudio específico sobre la peliculas biodegradables a partir de almidón de frijol macáçar (Vigna unguiculata), una leguminosa cercana filogenéticamente al Phaseolus vulgaris [14]. Sus investigaciones demostraron la factibilidad de obtener películas continuas y transparentes mediante técnicas de colada (casting), estableciendo parámetros críticos como la concentración óptima de almidón (2-4% p/v) y la proporción de plastificante (20-30% respecto al peso seco del almidón).

Los filmes obtenidos presentaron propiedades mecánicas aceptables y una biodegradabilidad superior al 80% en 30 días bajo condiciones de compostaje controlado. [15] expandieron el conocimiento sobre biodegradación fúngica de bioplásticos basados en almidón, demostrando que la velocidad de degradación depende significativamente de las condiciones ambientales y la composición del material. Sus hallazgos indicaron que la presencia de plastificantes como glicerol acelera los procesos de biodegradación bajo condiciones controladas de laboratorio. En el período 2021-2025, la investigación se enfocó en la optimización de propiedades mediante modificaciones físicas y químicas del almidón. [16] realizaron una caracterización fisicoquímica y morfoestructural completa de almidones extraídos de tres especies de *Phaseolus vulgaris* cultivadas en Chiapas, México. Los resultados mostraron rendimientos de extracción entre 21.4% y 28.7% dependiendo de la variedad, con diferencias significativas en contenido de amilosa (18.2-24.6%) y propiedades reológicas. Este estudio estableció la base científica para comparaciones varietales dentro del género *Phaseolus*, demostrando que las diferencias genéticas se reflejan en las propiedades funcionales del almidón extraído.

Por otro lado, [17] estudiaron la biodegradación de películas híbridos basados en almidón de mandioca y trigo, reportando tasas de degradación superiores al 80% en condiciones de compostaje durante 60 días. Este trabajo demostró la importancia de la caracterización química mediante pH para predecir el comportamiento de biodegradación de los materiales biopolímeros. [34] realizaron una revisión exhaustiva sobre el uso de almidones en la producción de materiales biodegradables, identificando que las leguminosas, particularmente el género Phaseolus, presentan almidones con características estructurales únicas debido a su contenido de amilosa (25-35%) y la presencia de compuestos fenólicos asociados que pueden influir en las propiedades antioxidantes de los materiales finales.

[18] realizaron el aislamiento y caracterización fisicoquímica de almidón de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris*), reportando un rendimiento de extracción del 25.8% y propiedades funcionales comparables a almidones comerciales. Este estudio específico sobre *Phaseolus vulgaris* proporcionó datos de referencia directamente aplicables a la investigación propuesta, estableciendo metodologías de extracción y parámetros de calidad para almidones de frijol. De forma complementaria, [10] elaboraron bioplásticos utilizando una mezcla de almidón de ayote (*Sechium edule*) y frijoles (*Phaseolus vulgaris*). Los autores evaluaron las propiedades físicas, la degradabilidad y la estabilidad del material bajo condiciones controladas de laboratorio. Se observó una degradación del 91 % en condiciones de suelo enterrado, confirmando el potencial del almidón de frijol para formular bioplásticos con propiedades adecuadas de resistencia y biodegradabilidad.

En términos de caracterización específica de almidones de frijol por variedades, los estudios disponibles muestran información fragmentada. Investigaciones realizadas en México y Brasil han sugerido que las variedades de frijol negro tienden a presentar mayor contenido de almidón (45-55% en base seca) comparado con variedades blancas (40-

48%) y rojas (42-50%) [14], [19], [16]. Sin embargo, estos valores pueden variar significativamente según condiciones de cultivo, madurez de la semilla y métodos de extracción empleados.

*C. Relación de la litera*tura con la investigación

La revisión de la literatura revela varios hallazgos fundamentales que respaldan la viabilidad de la investigación propuesta. Primero, los estudios demuestran que el almidón de *Phaseolus vulgaris* presenta características fisicoquímicas adecuadas para la formación de bioplásticos, con rendimientos de extracción competitivos comparados con otras fuentes vegetales [16], [18]. Segundo, las propiedades físicas de los bioplásticos (densidad, solubilidad, humedad) están directamente relacionadas con la composición del almidón de origen y las condiciones de procesamiento [12], [19]. Tercero, el pH emerge como un parámetro crítico que influye tanto en las propiedades del film como en su comportamiento de biodegradación [17]. Cuarto, los ensayos de biodegradabilidad mediante enterramiento en suelo y compostaje han demostrado ser metodologías confiables para evaluar el comportamiento ambiental de estos materiales [13], [15].

Los hallazgos más significativos incluyen la demostración de que el almidón de leguminosas, particularmente del género *Phaseolus*, puede producir filmes con excelentes tasas de biodegradabilidad (superiores al 90% en condiciones de suelo) y propiedades mecánicas aceptables para aplicaciones de empaque [10]. Estos resultados son particularmente relevantes para Honduras, donde la gestión de residuos sólidos representa un desafío ambiental creciente y donde el frijol constituye un cultivo de importancia económica y social. A pesar de los avances documentados, existen contradicciones significativas en la literatura revisada. Los rendimientos de extracción de almidón reportados varían considerablemente entre estudios, desde 21.4% hasta 50.3%, lo que sugiere diferencias metodológicas o varietales no controladas adecuadamente [16], [20].

Además, los protocolos de caracterización de propiedades físicas no están estandarizados, dificultando las comparaciones entre investigaciones. El principal vacío identificado es la ausencia de estudios comparativos sistemáticos entre diferentes variedades de *Phaseolus vulgaris* cultivadas en Centroamérica. Ninguna investigación ha evaluado específicamente las diferencias en rendimiento de almidón y propiedades de bioplásticos entre frijoles negros, blancos y rojos en condiciones tropicales. Este vacío es particularmente relevante para Honduras, donde estas variedades son cultivadas extensivamente, pero no han sido caracterizadas para aplicaciones en materiales biodegradables.

La investigación propuesta se fundamenta en tres teorías principales establecidas en la literatura. La teoría estructura-propiedad del almidón explica cómo la composición molecular (relación amilosa/amilopectina) y la estructura granular determinan las propiedades funcionales del polímero [16]. Esta teoría predice que las diferencias varietales en *Phaseolus vulgaris* se reflejarán en las características de los bioplásticos obtenidos. La teoría de matrices poliméricas biodegradables establece que las propiedades físicas y químicas de las películas determinan su comportamiento de degradación en ambientes naturales [17]. Finalmente, la teoría de valorización de recursos agrícolas locales sostiene que la utilización de materias primas regionales para aplicaciones tecnológicas contribuye al desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria [19].

III. Materiales y Métodos

A. Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, con enfoque cuantitativo y alcance descriptivo–comparativo. La investigación se realizó en los laboratorios de Química de la UNAH campus Cortés, en San Pedro Sula, Cortés, entre agosto y noviembre del año 2025. Cada tratamiento correspondió a una de las tres variedades de *Phaseolus vulgaris* (negro, blanco y rojo), y se efectuaron tres réplicas por tipo de frijol (n=9 por variable), siguiendo las recomendaciones metodológicas de estudios recientes en bioplásticos de almidón [8],[18]. El objetivo fue evaluar el rendimiento de extracción de almidón y las propiedades fisicoquímicas y de biodegradación de los bioplásticos elaborados.

B. Preguntas de investigación e hipótesis

Las preguntas de investigación se enfocaron en determinar (1) qué variedad de frijol produjo mayor rendimiento de almidón y (2) cuales eran las propiedades físicas, químicas y de degradación de los bioplásticos elaborados con los almidones de los frijoles. La variable independiente fue el tipo de frijol (negro, blanco y rojo), mientras que la variable dependiente fue el almidón. La hipótesis planteó que el tipo de frijol influía significativamente en el rendimiento de almidón y sobre las propiedades de los bioplásticos, mientras que la hipótesis nula estableció que no existían diferencias significativas entre variedades. La población, considerada infinita, estuvo constituida por frijoles secos comercializados en San Pedro Sula, y la muestra se definió mediante selección no probabilística dirigida, en función de la disponibilidad local. La unidad de análisis correspondió a cada película de bioplástico elaborada a partir del almidón extraído.

C. Procedimiento experimental

La extracción del almidón se realizó mediante el método húmedo, siguiendo protocolos utilizados en investigaciones recientes [21], [22]. Se pesaron 400 g de frijoles secos por variedad, se lavaron para eliminar impurezas y se remojaron durante 8 horas para facilitar la molienda. La mezcla se procesó en licuadora doméstica con una relación frijol: agua de 1:2, obteniendo una suspensión homogénea. El filtrado se realizó con tela fina para separar fibras y residuos sólidos.

El extracto se dejó decantar en envases de 1.5 L durante 6 horas, decantando el sobrenadante y repitiendo el proceso tres veces para incrementar la pureza. El almidón se secó al sol durante dos días, tal como se ha reportado [23]. Para la elaboración de los bioplásticos se utilizó el método de vaciado (casting) [24],[25]. En un vaso precipitado se mezclaron 10 g

de almidón con 100 ml de agua y 5 ml glicerina. La solución se calentó a 70–80°C con agitación constante para permitir la gelatinización del almidón. Posteriormente, la mezcla caliente se vació sobre bandejas y se secó en horno a 65°C durante 8 horas hasta obtener películas uniformes.

La caracterización de los bioplásticos incluyó determinación de: densidad (inmersión en agua), % de solubilidad (en agua por 24 horas), % de humedad (secado en termobalanza), y pH (utilizando un pH-metro calibrado con soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10). La biodegradabilidad se evaluó mediante el método gravimétrico, midiendo la pérdida de masa en un medio ácido (H_2SO_4 1M) durante seis días, siguiendo protocolos recientes para polímeros biodegradables [26]. El ensayo de pérdida de masa en H_2SO_4 1 M durante seis días se justifica como una prueba acelerada para evaluar la susceptibilidad estructural del material frente a la degradación química (hidrólisis abiótica); sin embargo, para extrapolar estos hallazgos hacia una verdadera 'biodegradación ambiental', este análisis preliminar debe complementarse con ensayos que evidencien la escisión enzimática y posterior asimilación metabólica por parte de microorganismos [37]. Se emplearon buretas y matraces aforados Pyrex, embudos, licuadora doméstica, bandejas para casting, estufa de calentamiento, horno de 65°C, pH-metro, soluciones buffer, balanza analítica y agua destilada. Para garantizar confiabilidad se calibraron los equipos de medición antes de cada jornada, conforme a las recomendaciones de validación reciente en trabajos de biodegradabilidad [27].

D. Verificación y validación de equipos de medición

La calibración consiste en comprobar que un instrumento opera adecuadamente y ofrece mediciones exactas dentro de los parámetros establecidos [28]. Este proceso actúa como un control de calidad, destinado a identificar posibles desviaciones ocasionadas por el desgaste natural, el uso incorrecto, impactos o condiciones inadecuadas de almacenamiento. Se realizaron procedimientos internos de verificación para asegurar la confiabilidad de las mediciones.

Con motivo de los experimentos de laboratorio programados para el mes de noviembre de 2025, se llevó a cabo el proceso de calibración y verificación de los instrumentos el pasado 24 de octubre, arrojando los siguientes resultados: la balanza analítica fue sometida a comprobación con una masa patrón de 100 g, admitiendo una desviación máxima de ±0.05 g, por lo que se declaró operativa dentro del margen aceptable; el pH-metro, calibrado diariamente con soluciones tampón de pH 4.00 y 7.00, ofreció lecturas estables con una precisión de ±0.02; el horno de secado, evaluado mediante un termómetro digital externo colocado en la cámara durante treinta minutos, mostró una variación térmica inferior o igual a ±3°C respecto al valor indicado; y la cristalería, respaldada por su graduación volumétrica de fábrica, fue validada para fines de medición comparativa.

Dicho procedimiento estuvo supervisado por el Instructor de laboratorio, en la calibración específica del pH-metro y del horno, quedando todos los equipos en condiciones óptimas para garantizar la exactitud y confiabilidad.

E. Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente para determinar diferencias significativas según la variedad de frijol. Estos se procesaron utilizando un enfoque estadístico basado en ANOVA, pruebas de Tukey, detección de valores atípicos mediante prueba de Grubb's y pruebas de normalidad, siguiendo los lineamientos de [29]. Asimismo, se desarrolló una matriz de correlación de Pearson para determinar relaciones entre las propiedades medidas.

F. Consideraciones éticas

La investigación cumplió principios de integridad científica, manejo responsable de residuos y uso seguro de reactivos ácidos. No involucró organismos vivos ni implicó riesgos biológicos. Se siguieron lineamientos institucionales de bioseguridad y sostenibilidad ambiental de la UNAH-VS.

IV. Resultados y Discusión

A. Resultados

El rendimiento de extracción del almidón mostró diferencias claras entre las tres variedades de *Phaseolus vulgaris*. El frijol negro presentó el mayor rendimiento (17.42 ± 0.8%), seguido por el frijol blanco y, finalmente, el rojo. Estos resultados evidenciaron que el frijol negro produjo la mayor cantidad de almidón recuperable a partir del peso inicial del grano.

En cuanto a las propiedades físicas de los bioplásticos obtenidos, la densidad mostró variaciones asociadas al tipo de almidón (Tabla I). El bioplástico elaborado con almidón de frijol negro presentó las densidades más altas (1.36 ± 0.03 g/ml), seguido por el de frijol blanco y, por último, el de frijol rojo. La humedad porcentual evidenció que el bioplástico de frijol negro retuvo más agua (9.35 ± 0.76%), con valores superiores a los observados en los bioplásticos de frijol rojo y negro. El frijol negro presentó la humedad más alta, lo que se reflejó en películas más secas y estables. La solubilidad en agua también mostró diferencias claras: el bioplástico de frijol blanco registró los porcentajes de solubilidad más altos (24.47 ± 1.28%), mientras que el de frijol negro presentó los valores más bajos.

El pH de las películas se mantuvo en rangos ligeramente ácidos para las tres variedades, ubicándose entre 5.6 y 6.2 El bioplástico derivado del frijol blanco registró el pH más bajo entre los tratamientos, mientras que el frijol negro presentó valores más cercanos a la neutralidad dentro del rango ácido. Las mediciones fueron consistentes entre réplicas, sin fluctuaciones abruptas ni valores atípicos.

TABLA I
RESUMEN DE PROPIEDADES DE LOS BIOPLÁSTICOS

Variable	Frijol Blanco	Frijol Rojo	Frijol Negro
Solubilidad (%)	24.47 ± 1.28	31.64 ± 1.54	31.41 ± 1.38
Humedad (%)	5.87 ± 1.05	8.70 ± 0.17	9.35 ± 0.76
Densidad (g/mL)	0.84 ± 0.01	1.13 ± 0.03	1.36 ± 0.03
pH	5.69 ± 0.01	5.61 ± 0.01	6.23 ± 0.02
% Biodegradación (2 d)	41.58 ± 1.06	26.25 ± 2.18	21.81 ± 2.04
% Biodegradación (4 d)	82.90 ± 1.00	54.43 ± 1.96	44.63 ± 1.90
% Biodegradación (6 d)	92.67 ± 0.69	85.64 ± 1.15	75.45 ± 1.25
% Rendimiento de almidón (%)	4.00 ± 0.25	11.25 ± 0.13	17.42 ± 0.88

Nota. Los valores corresponden al promedio ± desviación estándar obtenidos de tres bioplásticos individuales por cada tipo de frijol (blanco, rojo y negro).

En el análisis de biodegradabilidad, se observó una tendencia progresiva de degradación en todos los tratamientos a lo largo de los seis días. El bioplástico elaborado con almidón de frijol blanco mostró la mayor pérdida porcentual de masa, alcanzando valores altos (92.67 ± 0.69%), lo que indicó una degradación más rápida. El bioplástico de frijol rojo presentó una degradación moderada, mientras que el bioplástico derivado del frijol negro mostró la degradación más lenta, con pérdidas menores. Para garantizar la robustez de los análisis inferenciales y dado el reducido tamaño muestral (n=9 por variable), se aplicó la prueba de Dixon (Q Test) con el fin de identificar posibles valores atípicos en las ocho variables fisicoquímicas y de biodegradación evaluadas. Los resultados mostraron que todos los valores de probabilidad (p) fueron superiores al umbral del 5% (con un rango comprendido entre 0,583 y 1,000), lo que confirma la ausencia de valores extremos significativos en la totalidad de los ensayos. En consecuencia, se retuvieron las nueve observaciones correspondientes a cada variable para los procedimientos estadísticos subsiguientes, preservando así la integridad y homogeneidad del conjunto de datos experimentales.

Para verificar el supuesto de normalidad previo a los análisis paramétricos, se construyeron gráficos de probabilidad normal para cada variable experimental. Los resultados mostraron que la mayoría de las variables (porcentaje de solubilidad, humedad, densidad, porcentajes de biodegradación a 2, 4 y 6 días, y rendimiento de almidón) presentaron valores de probabilidad (p) superiores a 0,05, lo que indica un ajuste adecuado a la distribución normal y justifica la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) para dichas propiedades. En contraste, el pH no cumplió con el supuesto de normalidad ($p < 0,05$), por lo que se optó por una prueba no paramétrica (Mood's Median) para su evaluación, evitando así posibles inferencias inválidas derivadas del incumplimiento de este requisito estadístico.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) evidenciaron un efecto altamente significativo ($p < 0.05$) de la variedad de frijoles sobre todas las propiedades analizadas (Tabla II). Los altos valores del estadístico F indican una marcada influencia de la fuente de almidón en las características físicas, químicas y de biodegradabilidad del material, especialmente en el pH (F = 3365.78), la densidad (F = 426.79) y la biodegradación a los 6 días (F = 319.39). Valores elevados de F reflejan una alta diferencia entre grupos y mínima variabilidad interna, confirmando la significancia del factor estudiado [29]. Resultados similares fueron reportados en los cuales se destaca que la composición del almidón y el contenido proteico de las leguminosas influyen directamente en la densidad y biodegradabilidad de materiales poliméricos naturales [30].

TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS PROPIEDADES DE LOS BIOPLÁSTICOS

Variable	F	p-valor
% Solubilidad	19.214	0.0025*
% Humedad	29.002	0.0008**
Densidad	426.791	< 0.0001*
pH	3365.778	< 0.0001***
% Biodegradación (2 d)	75.195	0.0001***
% Biodegradación (4 d)	417.628	< 0.0001*
% Biodegradación (6 d)	319.393	< 0.0001***
% Rendimiento de Almidón	319.393	< 0.0001***

Con el fin de garantizar la validez de los procedimientos inferenciales, se verificó el cumplimiento de los supuestos paramétricos; específicamente, la variable rendimiento de almidón presentó un ajuste adecuado a la distribución normal ($p > 0.05$), lo que justificó la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) de un factor para las propiedades evaluadas. La significancia estadística de las diferencias observadas se reportó siguiendo la nomenclatura convencional de asteriscos (Tabla II), donde un asterisco (*) denota diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$), dos asteriscos (**) indican diferencias muy significativas con un 99% de confianza ($p < 0.01$) y tres asteriscos (***) reflejan diferencias altamente significativas con un 99.9% de confianza ($p < 0.001$); de este modo, el incremento en el número de asteriscos representa una evidencia estadística más sólida en contra de la hipótesis nula, reforzando la fiabilidad de los hallazgos.

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y, de manera implícita, la homogeneidad de varianzas, el ANOVA de un factor reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en todas las propiedades analizadas, comprendiendo el rendimiento de almidón, la densidad, el contenido de humedad, el porcentaje de solubilidad y los niveles de biodegradación en los distintos tiempos de evaluación. Estos resultados se presentan gráficamente en las Figuras 6, 7 y 9, las cuales integran el análisis de varianza con la prueba de comparaciones múltiples de Tukey; en dichas gráficas, la asignación de letras distintas sobre las barras que representan las medias establece diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), facilitando la identificación visual de los grupos homogéneos.

En particular, la prueba de Tukey con un intervalo de confianza del 95% aplicada al porcentaje de biodegradación a los 6 días (Tabla III) demostró diferencias estadísticamente significativas entre todas las variedades de frijol evaluadas, ya

que los intervalos de confianza para las diferencias de medias no incluyeron el cero en ningún par de comparaciones, lo que confirma que las medias de biodegradación son efectivamente distintas entre sí. De manera destacada, los bioplásticos elaborados con almidón de frijol blanco presentaron el porcentaje de biodegradación más elevado, superando ampliamente a los formulados con frijol negro y rojo, que registraron los valores más bajos. Este comportamiento diferencial sugiere que la variedad del frijol incide de manera determinante en la susceptibilidad a la degradación biológica, posiblemente debido a diferencias en la composición química del almidón, como la relación amilosa/amilopectina y el contenido de compuestos fenólicos, que afectan la cristalinidad y la resistencia de la matriz polimérica, modulando así la cinética de hidrólisis enzimática y la actividad microbiana durante el ensayo de biodegradación.

TABLA III
COMPARACIÓN MÚLTIPLE DE TUKEY

Variable	Grupos Tukey*
Solubilidad (%)	Rojo, Negro (A) > Blanco (B)
Humedad (%)	Negro, Rojo (A) > Blanco (B)
Densidad (g/mL)	Negro (A) > Rojo (B) > Blanco (C)
Biodegradación a 2 días (%)	Blanco (A) > Rojo, Negro (B)
Biodegradación a 4 días (%)	Blanco (A) > Rojo (B) > Negro (C)
Biodegradación a 6 días (%)	Blanco (A) > Rojo (B) > Negro (C)

Nota: *Letras distintas indican diferencias significativas entre medias según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las variedades de frijol para las propiedades físicas y la biodegradación de los bioplásticos obtenidos. La prueba de comparación múltiple de Tukey permitió identificar grupos homogéneos y establecer las diferencias entre las medias de cada tratamiento. En las propiedades físicas, los bioplásticos elaborados con almidón de frijol rojo y negro presentaron los mayores valores de solubilidad (31.64 ± 1.28% y 31.41 ± 1.38%, respectivamente), sin diferencias significativas entre ellos, mientras que el frijol blanco mostró el valor más bajo (24.47 ± 1.28%). Para el contenido de humedad, los bioplásticos de frijol negro (9.35 ± 0.76%) y rojo (8.70 ± 0.17%) conformaron un mismo grupo estadístico y superaron significativamente al frijol blanco (5.87 ± 1.05%). En cuanto a la densidad, se observaron diferencias significativas entre las tres variedades, registrándose el mayor valor en el frijol negro (1.36 ± 0.03 g/mL), seguido del frijol rojo (1.13 ± 0.03 g/mL) y del frijol blanco (0.84 ± 0.01 g/mL).

Respecto a la biodegradación, los porcentajes aumentaron progresivamente con el tiempo en todas las formulaciones. A los 2 días, el bioplástico de frijol blanco alcanzó el valor más elevado (41.58 ± 1.06%), diferenciándose significativamente de los bioplásticos elaborados con frijol rojo (26.25 ± 2.18%) y negro (21.81 ± 2.04%), los cuales no mostraron diferencias entre sí. A los 4 días se identificaron diferencias significativas entre las tres variedades, con porcentajes de 82.90 ± 1.00%, 54.43 ± 1.96% y 44.63 ± 1.90% para frijol blanco, rojo y negro, respectivamente. Finalmente, a los 6 días, el bioplástico elaborado con almidón de frijol blanco alcanzó el 92.67% de biodegradación, seguido por el frijol rojo (85.64%) y el frijol negro (75.45%), observándose diferencias significativas entre todos los tratamientos. Los resultados obtenidos confirman que la variedad de frijol tuvo un efecto significativo sobre las propiedades físicas evaluadas y sobre la velocidad de biodegradación de los bioplásticos durante el período de estudio. Debido al incumplimiento del supuesto de normalidad, el pH se analizó mediante la prueba no paramétrica de Mood's Median. La Figura 1 presenta las medianas de pH y sus respectivos intervalos de confianza al 95% para cada tratamiento.

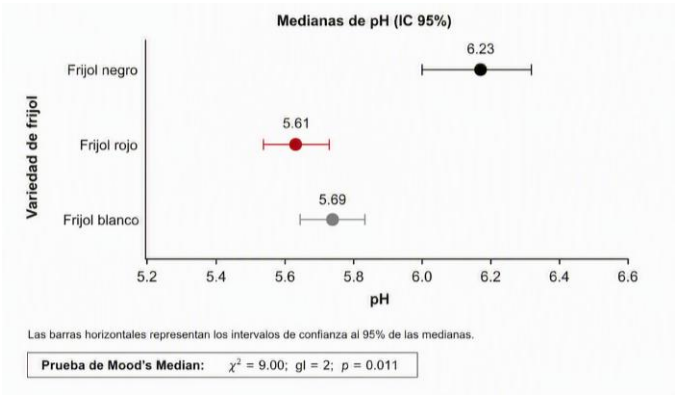


Fig. 1 Prueba de Mood´s Madian aplicada pH de bioplásticos

Como se observa en la Figura 1, los valores de pH difirieron significativamente entre las variedades de frijol estudiadas. El bioplástico elaborado con almidón de frijol negro presentó la mediana de pH más alta (6.23), seguido por el frijol blanco (5.69) y el frijol rojo (5.61). Los intervalos de confianza mostraron una clara separación entre el frijol negro y las demás variedades, corroborando los resultados obtenidos mediante la prueba de Mood's Median. En conjunto, estos resultados evidencian un efecto significativo de la variedad de frijol sobre el pH de los bioplásticos desarrollados.

Con el propósito de evaluar la asociación entre las propiedades fisicoquímicas de los bioplásticos elaborados a partir de almidón de frijol, se realizó un análisis de correlación de Pearson. La matriz de correlación presentada en la Figura 2 permite visualizar la magnitud y dirección de las relaciones entre las variables estudiadas, incluyendo solubilidad, humedad, densidad, biodegradación a diferentes tiempos y rendimiento de almidón.

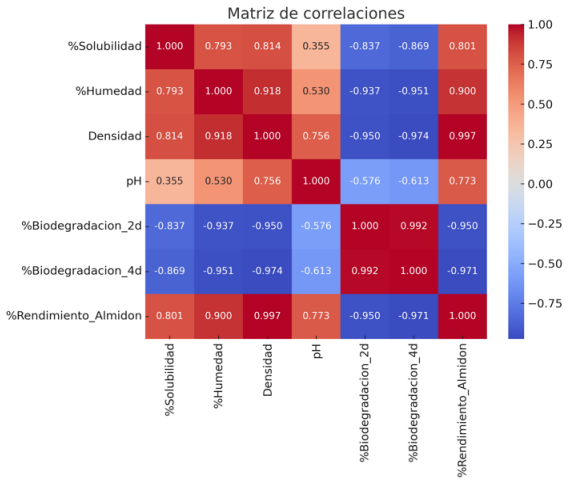


Fig. 2 Matriz de correlación entre las propiedades

La matriz de correlación mostró asociaciones de diversa magnitud entre las variables analizadas. La densidad presentó una correlación negativa muy fuerte con la biodegradación a los 6 días (r = -0.974), indicando una disminución de los porcentajes de biodegradación a medida que aumentó la densidad de los bioplásticos. De manera similar, se observaron correlaciones negativas entre la densidad y la biodegradación a los 2 días (r = -0.950) y a los 4 días (r = -0.974). El rendimiento de almidón mostró una correlación positiva muy fuerte con la densidad (r = 0.997), mientras que se relacionó negativamente con la biodegradación a los 2 días (r = -0.950), 4 días (r = -0.971) y 6 días (r = -0.971). Asimismo, la humedad presentó correlaciones negativas elevadas con la biodegradación a los 2 días (r = -0.937), 4 días (r = -0.951) y 6 días (r = -0.997).

Por otra parte, la solubilidad mostró una relación positiva con la humedad (r = 0.793), la densidad (r = 0.814) y el rendimiento de almidón (r = 0.801). En contraste, presentó correlaciones negativas con la biodegradación a los 2 días (r = -0.837), 4 días (r = -0.869) y 6 días (r = -0.859). Finalmente, los porcentajes de biodegradación registrados a los 2, 4 y 6 días mostraron correlaciones positivas muy fuertes entre sí ($r \geq 0.992$), evidenciando una alta consistencia en el comportamiento de degradación de las películas bioplásticas durante el período de evaluación.

En conjunto, la matriz evidencia asociaciones fuertes entre las propiedades estructurales del material y los indicadores de biodegradación evaluados. Se observa una correlación negativa alta entre densidad y degradación ($r = -0.97$, $p < 0.01$). La variedad de frijol determinó las propiedades y la resistencia a la hidrólisis ácida: el bioplástico de frijol negro (densidad 1.36 g/mL, humedad 9.35%, solubilidad 31.41%) mostró 68.57% de degradación, mientras el de frijol blanco, menos denso, se degradó casi completamente (92.67%). Este comportamiento, coherente con la correlación negativa densidad-degradación ($r = -0.974$, $p < 0.01$), sugiere una matriz semicristalina compacta, fenómeno documentado en almidones de leguminosas [32], [33].

B. Discusión

1) Interpretación de resultados: Los resultados demostraron que la variedad de Phaseolus vulgaris utilizada ejerció una influencia determinante sobre las propiedades fisicoquímicas y la biodegradabilidad de las películas elaboradas. Las diferencias observadas entre los bioplásticos de frijol blanco, rojo y negro reflejaron el papel central de la composición del almidón en la estructura final del material. Se identificó una correlación negativa muy fuerte entre densidad y biodegradabilidad en medio ácido, indicando que las películas más densas tendieron a degradarse más lentamente, un patrón ampliamente documentado en biopolímeros con estructuras compactas [31]. Desde una perspectiva molecular, este comportamiento se explica en gran medida por la proporción de amilosa presente en cada variedad. Los almidones de leguminosas suelen poseer contenidos elevados de amilosa (30–40 %), lo que favorece la formación de redes poliméricas más ordenadas y estables durante la gelatinización [32],[33]. La naturaleza lineal de la amilosa facilita la alineación de cadenas y la formación de enlaces de hidrógeno fuertes, generando matrices semicristalinas de mayor densidad y menor susceptibilidad a la degradación química. En este contexto, la estructura interna de los bioplásticos elaborados con frijol negro mostró una mayor cohesión, lo que explica su degradación más lenta frente al medio ácido. Los bioplásticos de frijol negro, más densos y duraderos en medio ácido, serían adecuados para envases que requieran mayor resistencia, mientras que los elaborados con frijol blanco, más biodegradables en medio ácido, tendrían mayor pertinencia en productos compostables o de un solo uso.

2) Comparación con estudios previos: Los resultados obtenidos se alinean parcialmente con los estudios previos incluidos, aunque es importante destacar que la mayoría de estas investigaciones se enfocan únicamente en una sola variedad de frijol, sin realizar comparaciones directas entre diferentes cultivares. Por ejemplo, investigaciones realizadas en México y Brasil han sugerido que las variedades de frijol negro tienden a presentar altos contenidos de almidón [14], [19]. De igual manera, los estudios de [18] y [34] analizan características de almidones de frijol rojo, pero no comparan específicamente el desempeño de frijol blanco, rojo y negro dentro de un mismo diseño experimental. Esta ausencia de evaluaciones comparativas limita la información disponible acerca del comportamiento diferenciado entre variedades, lo que resalta la importancia del enfoque adoptado en este trabajo.

La comercialización de estos biomateriales en el contexto centroamericano podría articularse mediante modelos de negocio de base cooperativa, para pequeños productores agrícolas que provean la materia prima a micro-biorrefinerías regionales, generando cadenas de valor descentralizadas y alineadas con los principios de la bioeconomía circular [35].

En Honduras, el frijol rojo constituye la variedad de mayor consumo y arraigo cultural, mientras que el frijol negro

presenta una demanda alimentaria significativamente menor; este patrón de preferencia dietética convierte al frijol negro en un candidato estratégico para la valorización industrial, al mitigar la competencia directa con la seguridad alimentaria y facilitar la aceptación social de su uso no convencional. No obstante, las barreras de escalamiento son significativas.

La transición del casting manual en la caja de Petri a procesos continuos como la extrusión termoplástica o el moldeo por compresión exige inversiones de capital elevadas y una reformulación precisa de plastificantes y aditivos que mantengan la procesabilidad sin sacrificar la biodegradabilidad, tal como se documenta en la literatura sobre escalado de materiales amiláceos [36]. La transferencia tecnológica desde los laboratorios universitarios hacia la industria del empaque demanda, además, mecanismos de financiamiento específicos para spin-offs de base tecnológica, como capital semilla de BID Lab, fondos de innovación nacionales (CONACYT en Honduras) o alianzas público-privadas orientadas a la sustitución de plásticos de un solo uso, cuyo papel en la bioeconomía ha sido analizado en estudios recientes [37].

3) Identificación de patrones, anomalías o limitaciones:

Los datos mostraron patrones consistentes entre réplicas y no se identificaron anomalías relevantes (sin valores perdidos ni valores atípicos). Cada variedad mantuvo un perfil característico claramente diferenciado, respaldado por los análisis estadísticos. Para garantizar la reproducibilidad del proceso, se estandarizó la velocidad (velocidad alta) y el tiempo de molienda (3 min por cada 400 g) para garantizar la uniformidad del tamaño de partícula. Asimismo, aunque las propiedades fisicoquímicas evaluadas permitieron establecer comparaciones robustas entre las variedades, no se incorporaron técnicas de análisis estructural como espectroscopía FTIR que podría fortalecer la explicación molecular basada en la proporción de amilosa.

V. Conclusiones

A. Conclusiones

El análisis de las propiedades físicas de los bioplásticos elaborados a partir de almidón de frijoles blanco, rojo y negro confirmó que el tipo de almidón influye de manera significativa en la estructura y comportamiento del material. Entre las variedades evaluadas, el bioplástico de frijol negro mostró el mejor desempeño físico, al presentar la mayor densidad, la menor solubilidad y el mayor contenido de humedad, características que reflejan una matriz más compacta, con mayor cohesión molecular y mayor capacidad de retención de agua sin comprometer su estabilidad. En contraste, los bioplásticos de frijol blanco y rojo evidenciaron una estructura más porosa y permeable, asociada a densidades menores, mayores porcentajes de solubilidad y valores más bajos de humedad. En conjunto, estos resultados demostraron que la densidad, la solubilidad y la humedad están estrechamente relacionadas con la resistencia y durabilidad del material, lo cual explica la degradación en medio ácido más lenta observada en los bioplásticos de frijol negro.

En relación con las propiedades químicas, el pH de los materiales se mantuvo en un rango ligeramente ácido y presentó diferencias significativas entre variedades. Esto sugiere que la acidez final del bioplástico está más asociada a las condiciones de elaboración y al plastificante utilizado que al tipo de almidón empleado. El comportamiento degradativo mostró una progresión clara a lo largo de los seis días de exposición.

El bioplástico de frijol blanco presentó la mayor pérdida de masa en medio ácido y, por tanto, la biodegradación más acelerada, seguido por el frijol rojo y, en último lugar, el frijol negro. Esta tendencia reafirma que una mayor densidad y menor solubilidad se relacionan con tasas de degradación más lentas. Así, mientras el bioplástico de frijol negro ofrece mayor estabilidad estructural en medios ácidos, los elaborados con frijol blanco y rojo constituyen alternativas de rápida biodegradación adecuadas para aplicaciones de corta vida útil o de desecho rápido.

B. Recomendaciones

Se recomienda que las próximas fases experimentales incorporen ensayos mecánicos normalizados (tracción, flexión y módulo de elasticidad) para correlacionar cuantitativamente la rigidez y la resistencia con la densidad y la humedad de cada formulación. Paralelamente, es necesario optimizar la etapa de procesamiento, ajustando la temperatura de gelatinización, el tiempo de secado controlado y la proporción másica de plastificante, con el objeto de mejorar la flexibilidad de las películas de frijol blanco y rojo sin sacrificar su elevada susceptibilidad a la hidrólisis ácida. Dada la estabilidad del pH, conviene evaluar la oxidación termoquímica y la fotodegradación de los materiales bajo radiación UV y ciclos de humedad, simulando condiciones reales de almacenamiento. Los ensayos de pérdida de masa deben trasladarse a matrices ambientales (suelo franco, compost maduro y agua inoculada) siguiendo las normas ISO 17556 o ASTM D5988, incluyendo medios alcalinos para contrastar la cinética de despolimerización en todo el espectro de pH. Finalmente, la integración de FTIR, SEM y DSC durante la degradación permitirá identificar los mecanismos de escisión de cadena y cuantificar la evolución de la cristalinidad, cerrando así la brecha entre las propiedades macroscópicas y la arquitectura molecular.

Agradecimiento/Reconocimiento

Los autores expresan su profundo agradecimiento a todos los profesores del Departamento de Química de la UNAH Campus Cortés por su orientación técnica, y muy especialmente a la Lic. Patricia Castro por su invaluable asistencia y apoyo logístico durante las pruebas en los laboratorios. Al proyecto de investigación "Obtención de Bioplástico a Base de Almidón de Tubérculos para Uso en Empaques de Productos Alimenticios" (Código: PI-727-DICIHT).

REFERENCIAS

[1] OECD, Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040. Paris: OECD Publishing, 2024. DOI: 10.1787/76400890-en

[2] UN Environment Programme, "Plastic pollution," UNEP, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.unep.org/plastic-pollution.

[3] CIEL, "The toxic impacts of plastic across its lifecycle," Center for International Environmental Law, 2022.

[4] M. K. Gurunathan, R. J. H. Navasingh, J. D. R. Selvam, y R. Čep, "Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging," Sci. Rep., vol. 15, no. 1, art. no. 15264, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-00221-0

[5] N. Nahar, M. H. Rahman, S. Hazra, y J. Ahmed, "Structural and pasting properties of lentil starch: A comprehensive review," Legume Sci., vol. 6, no. 4, art. no. e70013, 2024. DOI: 10.1002/leg3.70013

[6] K. Babaremu, O. P. Oladijo, y E. Akinlabi, "Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging," Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 30, pp. 103225–103243, 2023.

[7] Y. Guo y L. Guo, "Plastic degradation: 100–1000 years," (referencia citada en el texto).

[8] R. De Gracia, E. González, K. Vega, V. Montenegro, y N. Marín, "Elaboración de bioplástico a partir de almidón de granos," Rev. Iniciación Cient., vol. 10, no. 1, pp. 16–20, 2024. DOI: 10.33412/rev-ric.v10.1.3998

[9] Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG), "Reporte de cultivos agrícolas de Honduras," Tegucigalpa, Honduras, 2021.

[10] Saavedra et al., "Elaboración de bioplásticos utilizando almidón de ayote (Sechium edule) y frijoles (Phaseolus vulgaris)," (referencia citada en el texto como Saavedra et al., 2025).

[11] N. Pooja, S. Shashank, B. N. Singh, y N. Mazumder, "Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties," RSC Adv., vol. 14, 2024. DOI: 10.1039/d4ra04263h

[12] N. Ismail, S. M. Tahir, y M. A. Abdullah, "Synthesis and characterization of biodegradable starch-based bioplastics," Mater. Sci. Forum, vol. 846, pp. 673–678, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.846.673

[13] P. N. Meza Ramos, "Elaboración de bioplásticos a partir de almidón residual obtenido de peladoras de papa y determinación de su biodegradabilidad a nivel de laboratorio," Tesis de licenciatura, Univ. Nac. Agraria La Molina, Perú, 2016.

[14] D. M. A. Costa, A. F. Santos, E. D. Silva, y I. A. Silva, "Desenvolvimento e caracterização de filmes à base de amido de feijão macáçar (Vigna unguiculata)," HOLOS, vol. 33, no. 7, pp. 2–16, 2017.

[15] E. Bezirhan Arikan y H. D. Bilgen, "Investigation of fungal biodegradation of starch-based bioplastic spoon wastes," en Proc. Conf., 2019.

[16] R. L. Zapata-Luna et al., "Physicochemical, morpho-structural and rheological characterization of starches from three Phaseolus spp. landraces grown in Chiapas," J. Food Meas. Charact., 2021. DOI: 10.1007/s11694-020-00739-z

[17] H. O. Onovo, T. T. Akano, D. U. Onyegbule, E. T. Towolawi, y T. S. Ajala, "A study of biodegradation of hybrid bioplastic films blend from Manihot and Triticum biopolymer," Eur. J. Eng. Technol. Res., 2022.

[18] J. K. M. Philip, S. V. Shubhaharini, S. Sruthika, C. M. Pooja Lakshmi, y S. Ashwin Raj, "Isolation and physiochemical characterization of Red kidney bean (Phaseolus vulgaris L.) starch," Res. J. Biotechnol., vol. 19, no. 9, pp. 56–62, 2024.

[19] L. D. S. Cunha, T. A. D. Medeiros, M. R. Prado, y D. M. R. Filho, "Desenvolvimento de bioplásticos de amido de batata-doce: Uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais," Peer Review, vol. 6, no. 15, pp. 412–420, 2024.

[20] Neto y Alves, "Extracción de almidón y rendimiento," (referencia citada en el texto). (Sin DOI identificado)

[21] H. Cheng et al., "Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry," Trends Food Sci. Technol., vol. 114, pp. 70–82, 2021. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.05.017

[22] N. F. Nagai y S. C. Andrés, "Non-conventional starches isolated from agronomic-improved beans (Phaseolus vulgaris L.): A study of their structure and physicochemical properties," J. Sci. Food Agric., vol. 103, no. 11, pp. 5253–5260, 2023. DOI: 10.1002/jsfa.12595

[23] I. Sharma et al., "Synthesis and characterization of nano starch-based composite films from kidney bean (Phaseolus vulgaris)," J. Food Sci. Technol., vol. 58, no. 6, pp. 2178–2185, 2021. DOI: 10.1007/s13197-020-04728-4

[24] J. A. Chariguamán, "Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (Passiflora edulis spp.)," Tesis, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2015.

[25] A. Apriyanto, J. Compart, y J. Fettke, "A review of starch, a unique biopolymer—Structure, metabolism and in planta modifications," Plant Sci., vol. 318, art. no. 111223, 2022. DOI: 10.1016/j.plantsci.2022.111223

[26] F. P. La Mantia, L. Ascione, M. C. Mistretta, M. Rapisarda, y P. Rizzarelli, "Comparative investigation on the soil burial degradation behaviour of polymer films for agriculture before and after photo-oxidation," Polymers, vol. 12, no. 4, art. no. 753, 2020. DOI: 10.3390/polym12040753

[27] J. R. A. Pires, V. G. L. Souza, P. Fuciños, L. Pastrana, y A. L. Fernando, "Methodologies to assess the biodegradability of bio-based polymers—Current knowledge and existing gaps," Polymers, vol. 14, no. 7, art. no. 1359, 2022. DOI: 10.3390/polym14071359

[28] Mettler Toledo, "Calibration and quality," Mettler-Toledo International Inc., 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com.

[29] A. Field, Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics, 5th ed. London: SAGE, 2018.

[30] K. S. Sandhu y S. T. Lim, "Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties," Food Res. Int., 2020.

[31] H. Onyeaka, K. Obileke, G. Makaka, y N. Nwokolo, "Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging," Polymers, vol. 14, no. 6, art. no. 1126, 2022. DOI: 10.3390/polym14061126

[32] M. Ma, Y. Wang, M. Wang, J. Jane, y S. Du, "Physicochemical properties and in vitro digestibility of legume starches," Food Hydrocoll., vol. 63, pp. 249–255, 2017. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.09.004

[33] R. Thakur et al., "Starch-based films: Major factors affecting their properties," Int. J. Biol. Macromol., vol. 132, pp. 1079–1089, 2019. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190

[34] A. C. D. Lima, V. C. A. Frost, y F. A. R. Cardoso, "The use of starches in the production of biodegradable products: A review with temporal scope 2022–2023," Rev. Gestão Soc. Ambient., vol. 18, no. 9, art. no. e06322, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n9-165

[35] R. C. R. de Souza, L. A. B. Tessaro, and A. R. C. Duarte, "Bioeconomy and the valorization of agro-industrial residues in Latin America: Opportunities and challenges," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, pp. 4087–4102, 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00735-9.

[36] F. Xie, P. J. Halley, and L. Avérous, "Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 4, pp. 595–623, 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.07.002.

[37] A. L. J. Janssens, M. C. R. L. G. da Silva, and P. J. J. Alvarez, "Financing the bioeconomy: Barriers and opportunities in developing countries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 319, p. 128685, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128685.

[38] G. Gorrasi and R. Pantani (2018). Hydrolysis and biodegradation of poly(lactic acid). *Advances in Polymer Science*, 279, 119-151.