

Producción de bioplástico a partir de almidón como aporte a la economía circular de San José del Guaviare

Lina Paola Mendoza Vargas^{ID}; Natalia Katherine Quevedo Torres^{aID}; Lianny Shirley Guzmán Criollo^{ID}; Karen Daniela Castro Vásquez^{ID}; Paola Sánchez Chaverra^{ID}.

Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; Centro de Desarrollo Agroindustrial Turístico y Tecnológico del Guaviare. San José del Guaviare, Colombia.

^abioplasticosguaviare2024@gmail.com

Fecha recepción: 5 de diciembre de 2024

Fecha aceptación: 11 de junio de 2025

Resumen gráfico



Resumen

La presente investigación tuvo como propósito producir bioplástico aprovechando los residuos de las cosechas de los cultivos de yuca y chontaduro como aporte a la economía circular en el municipio de San José del Guaviare. Para ello, se realizó la producción de bioplástico con 5 tratamientos por triplicado, variando la concentración de la glicerina en el proceso de polimerización, obteniendo resultados favorables con el almidón de yuca. Se analizaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las películas de bioplástico y se evaluó el verdor químico del proceso de producción mediante la métrica holística Green Star.

Se identificó una correlación entre la concentración de la glicerina y las propiedades finales del bioplástico. Al aumentar la concentración durante la fase de polimerización hay una disminución de la viscosidad de 83 695 a 28 068 cP a 10 rpm con husillo R4, mientras que en el proceso de secado se aumentan los tiempos de 12 a 45 horas, obteniendo películas con mayor elasticidad visualmente. Con la prueba mecánica realizada al tratamiento T1 10 %p de glicerina, se obtuvo una tensión de 0,30 MPa y dureza de 27,5 SHORE A, lo que constató el material como flexible; en la medición de DQO y DBO del bioplástico en degradación en agua, se obtuvo un índice del 0,59, indicando alta biodegradabilidad. Por lo tanto, se puede concluir que la producción de bioplástico representa una oportunidad para disminuir del impacto ambiental del uso del plástico convencional, siendo un proceso con un 90 % de verdor químico.

Palabras clave: Agroindustria; Aguas Residuales; Aprovechamiento de Residuos; Biodegradable; Bioeconomía; Fuentes Renovables; Impacto Ambiental; Medio Ambiente; Microplástico; Plásticos Convencionales; Polimerización; Química Verde.

Cita: Mendoza Vargas LP, Quevedo Torres NK, Guzmán Criollo LS, Castro Vásquez DC, Sánchez Chaverra P. Producción de bioplástico a partir de almidón como aporte a la economía circular de San José del Guaviare. rev. ion. 2025;38(1);37-51. <https://doi.org/10.18273/revion.v38n1-2025002>

Production of bioplastic from starch as a contribution to the circular economy of San José del Guaviare

Abstract

The purpose of this research was to produce bioplastic using crop residues from cassava and peach palm crops as a contribution to the circular economy in the municipality of San José del Guaviare. To this end, bioplastic production was carried out with five triplicate treatments, varying the glycerin concentration in the polymerization process, obtaining favorable results with cassava starch. The physical, chemical, and mechanical properties of the bioplastic films were analyzed, and the chemical greenness of the production process was evaluated using the Green Star holistic metric.

A correlation was identified between glycerin concentration and the final properties of the bioplastic. Increasing the concentration during the polymerization phase resulted in a decrease in viscosity from 83,695 to 28,068 cP at 10 rpm with an R4 screw. The drying process increased from 12 to 45 hours, resulting in films with greater visual elasticity. With the mechanical test carried out on the T1 10 wt% glycerin treatment, which obtained a tension of 0.30 MPa and a hardness of 27.5 SHORE A, it was confirmed that the material is flexible; in the measurement of COD and BOD of the bioplastic degrading in water, it obtained an index of 0.59, indicative of high biodegradability. Therefore, it can be concluded that the production of bioplastic represents an opportunity to reduce the environmental impact of the use of conventional plastic, being a process with 90 % chemical greenness.

Keywords: *Agribusiness; Wastewater; Waste Recycling; Biodegradable; Bioeconomy; Renewable Sources; Environmental Impact; Environment; Microplastics; Conventional Plastics; Polymerization; Green Chemistry.*

Produção de bioplástico a partir de amido como contribuição à economia circular de San José del Guaviare

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi produzir bioplástico utilizando resíduos de culturas de mandioca e pupunha como contribuição para a economia circular no município de San José del Guaviare. Para tanto, a produção de bioplástico foi realizada com cinco tratamentos triplicados, variando a concentração de glicerina no processo de polimerização, obtendo resultados favoráveis com amido de mandioca. As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos filmes de bioplástico foram analisadas, e a ecologização química do processo de produção foi avaliada usando a métrica holística Green Star.

Foi identificada uma correlação entre a concentração de glicerina e as propriedades finais do bioplástico. O aumento da concentração durante a fase de polimerização resultou em uma diminuição da viscosidade de 83 695 para 28 068 cP a 10 rpm com um parafuso R4. O processo de secagem aumentou de 12 para 45 horas, resultando em filmes com maior elasticidade visual. Com o ensaio mecânico realizado no tratamento T1 com 10 %p de glicerina, que obteve uma tensão de 0,30 MPa e uma dureza de 27,5 SHORE A, confirmou-se que o material é flexível; na medição de DQO e DBO do bioplástico degradando-se em água, obteve-se um índice de 0,59, indicativo de alta biodegradabilidade. Portanto, pode-se concluir que a produção de bioplástico representa uma oportunidade para reduzir o impacto ambiental do uso do plástico convencional, sendo um processo com 90 % de chemical greenness.

Palavras-chave: *Agronegócio; Águas Residuais; Reciclagem de Resíduos; Biodegradável; Bioeconomia; Fontes Renováveis; Impacto Ambiental; Meio Ambiente; Microplásticos; Plásticos Convencionais; Polimerização; Química Verde.*

Introducción

El plástico es un material sintético moldeable que se obtiene mediante la polimerización de derivados del petróleo, tiene la característica de ser liviano y resistente a los procesos de oxidación por acción de la humedad, el oxígeno o productos químicos, lo que lo convierte en un material duradero, impermeable y resistente, útil en diversas aplicaciones [1]; sin embargo, el tiempo de degradación de este material en el ambiente se estima entre 50 y 500 años, dependiendo del tipo de plástico, el tamaño y las condiciones ambientales de exposición [2]. De acuerdo con el programa para el medio ambiente de la ONU [2], en el proceso de degradación del plástico este no desaparece, sino que se genera una fragmentación del material en partículas más pequeñas o microplásticos [2,3].

Entre los plásticos más comunes se encuentran el PET o polietileno tereftalato el cual es empleado en la fabricación principalmente de botellas plásticas como las utilizadas para los envases de agua y refrescos; PEAD o polietileno de alta densidad utilizado en los recipientes que se utilizan en el shampoo, helados, entre otros; PVC o cloruro de polivinilo utilizado principalmente en tuberías; LDPE o polietileno de baja densidad utilizado en la fabricación de bolsas de plástico; PP o polipropileno utilizado en la fabricación de tapas de botella o bolsas de alimentos; PS o poliestireno con lo que se fabrica cubiertos, vasos, platos desechables; y otros plásticos como el acrílico o policarbonato que se utilizan para CDs, gafas de sol, entre otros [3,4].

A nivel mundial, los plásticos de un solo uso generan toneladas de desechos que terminan principalmente en los rellenos sanitarios, ríos y océanos, siendo insostenible ambientalmente debido a los tiempos de degradación, la falta de cultura ciudadana en la separación de reciclaje y la falta de políticas de reciclaje más estrictas [2,3]. En Colombia, a partir del 7 de julio de 2024 entró en vigor la Ley 2232 de 2022 que regula la producción, comercialización y consumo de plásticos de un solo uso, como son las bolsas en los puntos de pago para cargar o transportar mercancía, con excepción de las reutilizables, bolsas para periódicos o revistas, rollos de bolsas vacías en supermercados, mezcladores o pitillos para bebidas, soportes plásticos para bombas de inflar y soportes plásticos para copitos de algodón [5]. Para el año 2030, esta ley proyecta

que se dejen de comercializar plásticos para envases, empaques o recipientes de consumo inmediato como los desechables para alimentos, platos, bandejas, vasos, cubiertos y guantes para comer, confeti, manteles y serpentinas, adhesivos, etiquetas o distintivos que se fijan en las frutas y vegetales, y empaques que se utilizan para comercializar frutas y tubérculos que cuentan con cáscara naturalmente; de esta ley se generan excepciones con los plásticos reutilizables, productos biodegradables o compostables, productos plásticos fabricados 100 % de material reciclado, productos plásticos para uso médico o higiénico, plásticos para contener productos químicos o residuos peligrosos, bolsas para empacar productos o bienes de la canasta familiar [5,6].

En el municipio de San José del Guaviare la empresa encargada de proveer el servicio de acueducto y alcantarillado es EMPOAGUAS E.S.P, quien realiza la labor de limpieza de los drenajes de las alcantarillas, llegando a recolectar al año entre 500 y 1000 kilogramos de desechos plásticos; sin embargo, no cuentan con un dato estadístico en cuanto a la clasificación del tipo de plástico y cantidad que se encuentran en estos desechos. Por otro lado, la labor de recolección de basuras la realiza la empresa AMBIENTAR SA; no obstante, esta empresa no realiza una separación de residuos, por lo que éstos se disponen mezclados en el relleno sanitario, considerándose una problemática ambiental insostenible en el tiempo a medida que se llegue a la capacidad instalada del relleno sanitario [7].

La labor de reciclaje en el municipio es realizada por aproximadamente 109 recicladores de oficio, quienes se dedican a la recolección principalmente de plásticos convencionales de un solo uso. En el mes de julio de 2024 se efectuaron encuestas a los recicladores de oficio sobre la labor del reciclaje; se logró identificar que el mayor residuo recolectado son botellas y bolsas plásticas con un 52,4 % acumulado, mientras que residuos plásticos que menos se recolectan son los pitillos y envases desechables como vasos, cubiertos platos que corresponden al 67,7 % acumulado, los cuales quedan a cargo del servicio de recolección de basuras para su disposición final [8]. Adicionalmente, se indagó sobre la transición del uso del plástico convencional a bioplásticos, donde el 40 % de los recicladores encuestados consideran que su labor se vería afectada con la generación de bioplásticos, mientras que el 60 %

no percibe como una amenaza la producción de bioplásticos en su labor de recolección [8].

Los bioplásticos se elaboran con fuentes renovables como el almidón, la celulosa, los alginatos, proteínas, lípidos, ácido poliláctico, polihidroxiácidos y polihidroxibutirato [9], tienen la característica de ser biodegradables, se pueden emplear en la producción de diversos productos como lo hacen los plásticos convencionales, tienen un bajo consumo energético en su producción, reducen la huella de carbono, la generación de residuos y son seguros para la salud humana [10,11].

El almidón es una macromolécula de tipo polisacárido compuesta por amilosa y amilopectina, cuyo porcentaje de participación varía dependiendo de la fuente de extracción como tubérculos o cereales. Esta macromolécula se puede polimerizar cambiando su estructura mediante un plastificante, adquiriendo la característica de termoplástico [11,12].

La producción de bioplástico a partir de almidón es un proceso sencillo que no requiere equipo tecnológico avanzado y cuyos materiales son accesibles. Para este proceso se emplea almidón, agua, glicerina como agente plastificante, y ácido acético grado alimentario para mejorar la estabilidad del almidón. El proceso consiste en mezclar el almidón en el agua, agregar la glicerina y el ácido acético, manteniendo en agitación y calentamiento constante por un tiempo determinado donde se evidencia la formación de una textura gomosa que identifica la polimerización del almidón; posteriormente, la mezcla se vierte en moldes y se deja secar a temperatura ambiente o en horno no mayor a 45 °C de 24 a 48 horas, dependiendo del grosor de la película formada [9,13,14]. Este bioplástico se puede utilizar en la fabricación de productos biodegradables como empaques o embalajes de alimentos, bolsas, utensilios desechables, aplicaciones agrícolas como cubiertas de suelos, espumas o materiales amortiguadores en el embalaje, entre otros [15,16], y a diferencia de los plásticos, su tiempo de degradación puede variar de algunos meses a 6 años, aproximadamente [17].

Se han adelantado diferentes investigaciones en el ámbito de buscar una alternativa que reduzca el impacto ambiental de los plásticos a partir del uso de materias primas renovables como el almidón. Meza *et al.* realizaron una investigación en 2019 para la producción de bioplástico utilizando almidón de papa, realizando

variaciones en la concentración de glicerina y ácido acético, encontrando una relación directa entre la flexibilidad y la fragilidad del bioplástico a medida que se aumenta la dosificación de los agentes plastificantes [18]; por su parte, Holguín también realizó una investigación para la elaboración de bioplástico a partir de almidón de papa, encontrando que la temperatura y velocidad de secado afectan las propiedades finales del bioplástico y que el secado a altas temperaturas convierte las láminas en un material quebradizo [11]. Por otro lado, en 2020 Avellán *et al.* realizaron una investigación para la obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz, donde encontraron un porcentaje de degradación del bioplástico del 89,4 % en 42 días [14]. Este mismo año, Cornejo *et al.* investigaron la producción de películas de almidón termoplástico biodegradable utilizando almidón de papa y yuca, donde evidenciaron que, a mayor concentración de los agentes plastificantes (glicerina y ácido acético), aumenta la flexibilidad, mientras que, a menor concentración, aumenta la rigidez; adicionalmente encontraron que la temperatura y la velocidad de agitación propician la formación de burbujas que afectan la calidad final de las películas. Estas películas se sometieron a un ambiente de compostaje encontrando tiempos de descomposición de 1 a 2 meses en ambientes con alto contenido de humedad y materia orgánica, y de 3 a 6 meses en ambientes de poca materia orgánica y baja humedad [19].

Para poder determinar que un producto es ambientalmente sostenible y no representa un riesgo para la salud humana se puede analizar mediante la métrica holística Green Star, la cual evalúa de manera semicuantitativa el verdor químico de un producto, sustancia o proceso, analizando los 12 principios de la química verde [20,21]. La química verde tiene por objeto reducir el riesgo ambiental y para la salud humana en la producción de nuevos productos, sustancias o procesos químicos, mediante la implementación de 12 principios que consisten en prevención de residuos, economía atómica, síntesis menos peligrosas, diseño de productos químicos más seguros, disminución del uso de disolventes y auxiliares más seguros, diseños con eficiencia energética, uso de materias primas renovables, reducción de derivados, catálisis, diseño de sustancias biodegradables, prevención de contaminantes en tiempo real y químicos seguros para la prevención de accidentes [22].

Por esta razón, en este estudio se analizó la producción de bioplástico a partir de almidón para generar un aprovechamiento agroindustrial de los residuos que no se comercializan como materia prima de los cultivos de yuca y chontaduro del municipio de San José del Guaviare, donde se identificaron las propiedades físicas, mecánicas y químicas del bioplástico y se aplicó la química verde para determinar el verdor químico del proceso, así como los posibles productos terminados que se pueden desarrollar como aporte a la economía circular del municipio.

Materiales y métodos

Material de proceso: para el proceso de producción de bioplástico se utilizaron insumos de origen vegetal. El almidón de yuca se obtuvo de la cooperativa COOAMACOL conformada por población campesina y reincorporados, ubicada en la vereda Colinas del municipio de San José del Guaviare, donde procesan la yuca para producir almidón; mientras que el almidón de chontaduro comercial se obtuvo con la empresa Agroindustria del Bosque Amazónico SAS del municipio de San José del Guaviare, empresa que se encuentra en proceso de estandarización de este nuevo producto; por otra parte, se utilizó glicerina y ácido acético grado alimentario.

Producción de bioplástico: los experimentos se realizaron a escala de laboratorio, por triplicado, en vasos de precipitados Beakers con capacidad de 600 mL, tomando como referencia la metodología planteada por Cornejo *et al.* [19]. Para la producción del bioplástico se planteó un diseño experimental con una única variable independiente: la concentración del agente plastificante (glicerina). Por cada 100 g de agua destilada, se añadieron 20 % de almidón y 1,5 % del ácido acético grado alimentario (en peso). Se establecieron cinco tratamientos con diferentes proporciones de glicerina: T1: 10 %p, T2: 8 %p, T3: 6 %p, T4: 4 %p y T5: 2 %p. Durante los experimentos se mantuvo agitación constante en plancha de calentamiento con agitación magnética a 450 rpm y temperatura media inferior a 100°C, estableciendo un tiempo de polimerización de 30 minutos. Al finalizar se vertió el bioplástico en moldes de silicona y vidrio, y se secó en horno a una temperatura de 45°C hasta alcanzar peso constante.

Caracterización del bioplástico

Sólidos totales: para el cálculo de los sólidos totales se pesaron en una caja Petri $2 \pm 0,5$ gramos de bioplástico muestreado al finalizar la polimerización por triplicado, esta muestra se secó en horno a 100 ± 2 °C por 2 horas, con pesaje en balanza de precisión, hasta alcanzar peso constante. Los datos se analizaron bajo la [Ecuación 1](#).

$$\text{Sólidos totales: \%} = \frac{C-A}{B-A} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A= masa de la placa de pesado (g).

B= masa de la placa más la muestra original (g).

C= masa de la placa más la muestra seca (g).

Prueba de viscosidad aparente: se tomó una muestra de 150 mL de bioplástico en el minuto 10 de agitación de la polimerización donde la muestra se encuentra espesa, se analizó en viscosímetro First Plus, husillo R-4, velocidad 10 y 250 rpm, temperatura 60 °C y tiempo 130 segundos.

Análisis de agua residual no doméstica: se tomaron 100 g de la película de bioplástico seca y se dejó en un recipiente sin tapa con 6 litros de agua potable durante 15 días como medida inicial; la muestra para análisis se tomó siguiendo el protocolo establecido por el laboratorio del Centro de Calidad de Aguas de la Universidad de Los Llanos en Villavicencio (Meta) [23], acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios ambientales de Colombia – IDEAM mediante resolución No. 0752 del 2024, el cual lo habilita para la producción de información cuantitativa física, química y biótica para el desarrollo de estudios o análisis ambientales requeridos bajo lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración” versión 2017. Para ello, se realizaron pruebas de caracterización fisicoquímica del agua residual no doméstica con el fin de determinar los parámetros in situ pH/T (und. pH, técnico potenciómetro), y ex situ sólidos totales (mg/L) (técnica gravimétrica), DBO₅ (mg O₂/L) (técnica incubación a 5 días con sonda óptica), DQO (mg O₂/L) (técnica titulometría con reflujo cerrado), y biodegradabilidad del agua residual con relación DQO/DBO₅.

Pruebas mecánicas: se elaboró una película de bioplástico con 3,5 mm de espesor bajo las condiciones del tratamiento T1 con mayor concentración de glicerina, la cual se envió al laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo en Soldadura de la Institución Universitaria Pascual Bravo en Medellín (Antioquia), donde ajustaron la muestra a las medidas requeridas mediante maquilado para la prueba de tensión, de acuerdo con la norma ASTM D638, en el equipo SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X, desplazando la mordaza móvil a una velocidad controlada de 50 mm/min hasta la falla, y se realizó la prueba de dureza utilizando la escala SHORE A, de acuerdo con las normas ASTM2240 [24] e ISO 7619 [25]; todos los ensayos se realizaron por triplicado para determinar el valor promedio.

Medición de verdor químico con metodología métrica Green Star: para medir el verdor químico de la producción de bioplástico, comparado con el plástico convencional, se aplicó la metodología de la métrica holística Green Star planteada por Ribeiro *et al.* [21], la cual evalúa de manera semicuantitativa los principios de la química verde asignando una puntuación a cada principio de 1 a 3, donde 3 es el mayor grado de verdor, 2 representa un verdor intermedio y 1 no representa verdor químico. Posteriormente, se graficó la puntuación obtenida de cada principio en un diagrama radar con forma de estrella donde cada punta representa un principio evaluado que se puede visualizar de manera independiente. Se evaluaron los principios de la química verde 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 12 que hacen referencia

a experimentos con síntesis como el bioplástico; los principios 4 y 11 no se evaluaron dado que no es una situación de química industrial que requiera el diseño de productos químicos seguros y prevención de contaminantes en tiempo real. La puntuación máxima que se puede obtener en los 10 principios evaluados son 30 puntos, que indican 100 % de verdor químico, mientras que la puntuación mínima a obtener son 10 puntos que indican 0 % de verdor químico, este porcentaje se representa en el área verde de la estrella graficada.

Resultados y discusión

Producción de bioplástico: el proceso de polimerización de los respectivos almidones para la obtención de bioplástico presentó resultados diferentes con la aplicación del procedimiento establecido. En todos los tratamientos, la polimerización del almidón de yuca inició cuando la mezcla alcanzó una temperatura de 60 °C: al llegar a esta temperatura la mezcla se espesó rápidamente e inició un cambio paulatino de coloración; la coloración inicial de la mezcla era blanca (Figura 1a) y a medida que se iba agitando en la plancha de calentamiento su textura se tornó gomosa y ligeramente traslúcida (Figura 1b). Después de 30 minutos de agitación, en un rango de temperatura de 70 a 80 °C, la mezcla disminuyó su viscosidad tornándose fluida, sin resistencia a la agitación y con una coloración final traslúcida (Figura 1c), en este punto se finalizó la polimerización y se retiró de la plancha de calentamiento.

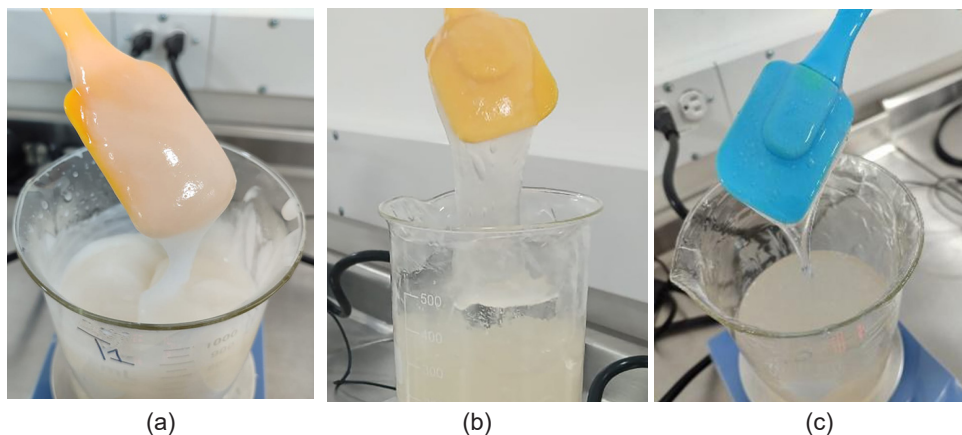


Figura 1. Variación de la textura y color en la producción de bioplástico con almidón de yuca.

El bioplástico obtenido a partir de almidón de yuca presentó una textura final fluida con presencia de burbujas, generadas por acción de la agitación y el

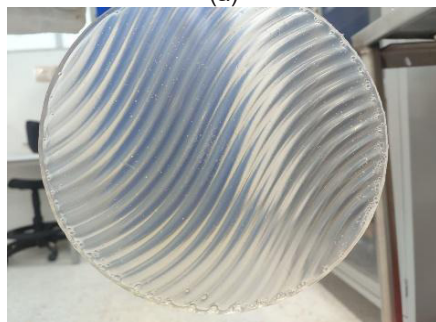
calentamiento en la polimerización, se observó que el reposo previo al secado permite la disminución de las burbujas, otorgándole así 10 minutos

de reposo para disminuir imperfecciones en el proceso de secado de las películas de bioplástico. De acuerdo a la investigación de Cornejo *et al.*, “las altas temperaturas en el proceso de gelatinización del almidón termoplástico pueden generar burbujas ocasionando que la biopelícula no sea uniforme” [19], sin embargo, no registran acciones que hayan realizado para disminuir las imperfecciones. En el caso particular del bioplástico obtenido a partir del almidón de chontaduro, no se permitió el reposo dado que se evidenció la formación de una especie de nata superficial que alteraba el moldeado, por lo que se vertió inmediatamente a moldes para llevar a secado; esta situación sugiere que la formación de burbujas se presenta por procesos aislados a la polimerización, los cuales requieren mayor investigación para obtener un producto final que cumpla con criterios de calidad.

Las películas de bioplástico se secaron a una temperatura no mayor a 45 °C, para evitar la formación de burbujas que afecten la calidad final del bioplástico [26]. En la Figura 2a se evidencia una película de bioplástico secada en vidrio, mientras que en la Figura 2b se evidencia una película secada en molde de silicona con canales en la base; los moldes de vidrio son ideales para secar las películas, mientras que el molde de silicona debe ser liso para evitar que los canales generen imperfecciones durante el secado.



(a)



(b)

Figura 2. Lámina de bioplástico generada con almidón de yuca.

En el caso de la polimerización del almidón de chontaduro, todos los tratamientos iniciaron cuando la mezcla alcanzó una temperatura de 65 °C. Al llegar a este punto, la mezcla se espesó rápidamente e inició un cambio paulatino de coloración, donde inicialmente era beige (Figura 3a), y a medida que se agitaba, su textura se fue tornando gomosa semifluida, con una coloración beige semitransparente (Figura 3b). Después de 30 minutos de agitación, en un rango de temperatura de 70 a 80 °C, la mezcla disminuyó su viscosidad tornándose fluida, sin resistencia a la agitación, conservando su coloración beige semitransparente. Este bioplástico se vertió inmediatamente en moldes, dado que el reposo fomenta la formación de nata que afecta el moldeado previo al secado.



(a)



(b)

Figura 3. Variación de la textura y color en la producción de bioplástico con almidón de chontaduro.

Las películas de bioplástico se secaron a una temperatura no mayor a 45 °C; sin embargo, no se logró formar una película a partir del almidón de chontaduro dado que esta se fracturó durante el secado en los diferentes tratamientos (Figura 4). En este sentido, para el proceso de producción de bioplástico a partir de almidón de chontaduro se requiere revisar el diseño experimental con el fin de obtener resultados que consideren la composición del almidón, debido a que aún se encuentra en estandarización por parte de la empresa que lo suministró, así como la concentración de glicerina y ácido acético.

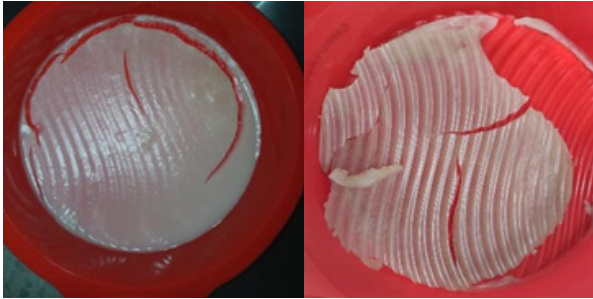


Figura 4. Lámina de bioplástico de chontaduro fracturada durante el proceso de secado.

En el proceso de secado de las películas de bioplástico con almidón de yuca, se pudo determinar una variación del tiempo de secado en función del porcentaje de glicerina en los

diferentes tratamientos. Los datos fueron sometidos a la prueba de Shapiro-Wilks donde se confirmó su normalidad y se realizó un análisis de varianza mediante el test LSD Fisher, con un nivel de confianza del 95 % utilizando el software Infostat Profesional [27] (Tabla 1, 2 y 3). Como se evidencia en la Tabla 3, el tratamiento con menor tiempo de secado fue el T5 (2 %p de glicerina), con 13 horas de secado y una característica visual de una película rígida, a diferencia del tratamiento T1 (10 %p de glicerina) que tardó 45 horas en secar y la película tuvo una característica visual de elasticidad; lo que evidencia que la glicerina incrementa la elasticidad del bioplástico a medida que se aumenta su concentración, requiriendo así mayor tiempo de secado [11,18].

Tabla 1. Análisis de la varianza.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Horas de Secado	15	0,99	0,98	6,39

Tabla 2. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1982,84	4	495,71	168,88	<0,0001
% Glicerina	1982,84	4	495,71	168,88	<0,0001
Error	29,35	10	2,94		
Total	2012,19	14			

Tabla 3. Test: LSD Fisher Alfa = 0,05 DMS = 3,11692.

% Glicerina	Medias	n	E.E.	
0,10	45,00	3	0,99	A
0,08	34,50	3	0,99	B
0,06	22,33	3	0,99	C
0,04	19,23	3	0,99	C
0,02	12,90	3	0,99	D

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Caracterización del bioplástico

Dado a que no se logró formar una película de bioplástico con almidón de chontaduro, la metodología planteada se analizó para las películas de bioplástico formadas con almidón de yuca.

Sólidos totales: en la Tabla 4 se observa una diferencia en el rendimiento promedio de cada uno de los tratamientos. T1 con 10 %p de glicerina presentó un porcentaje de sólidos totales del 19,7 %, mientras que T5 con 2 %p de glicerina

presentó un porcentaje de sólidos totales del 14,9 % de sólidos totales, mostrando una diferencia del 4,8 %, por lo que se considera que en T1 la cantidad de glicerina influyó en el secado al otorgar flexibilidad (Tabla 3), lo que pudo alterar los resultados, al requerir mayor tiempo de secado a diferencia de los demás tratamientos [11,23]. Se puede identificar que el bioplástico tiene un rendimiento entre el 16,6 y 18 % en peso final, de acuerdo con los resultados de los tratamientos T2 a T4, los cuales presentan similitudes en los resultados con una variación del 1,4 %.

Tabla 4. Porcentaje de sólidos totales.

Tratamiento	%p glicerina	%p sólidos totales
T1	10	19,7
T2	8	17,5
T3	6	18,0
T4	4	16,6
T5	2	14,9

Prueba de viscosidad aparente: en la [Tabla 5](#) se puede evidenciar que la concentración de glicerina afecta la viscosidad del bioplástico en la fase de polimerización. T1 con 10 %p de glicerina presentó una menor viscosidad con 28 068 cP a 10 rpm, mientras que T5 con 2 %p de glicerina presentó una viscosidad de 83 695 cP a 10 rpm. Al aumentar la velocidad a 250 rpm, la tensión cortante aplicada disminuyó la viscosidad, siendo T1 el tratamiento con el menor valor (4668 cP), lo que se correlaciona con un mayor tiempo de secado y aumento de la flexibilidad aparente del bioplástico de la [Tabla 3](#).

Tabla 5. Viscosidad del bioplástico.

Tratamiento	% Glicerina	CP	
		10 rpm	250 rpm
T1	0,10	28 068	4 668
T2	0,08	29 569	5 592
T3	0,06	38 755	6 826
T4	0,04	40 106	7 048
T5	0,02	83 695	11 378

Se puede establecer que, para elaborar bioplástico en una escala industrial, el sistema de agitación a baja velocidad debe estar en la capacidad poder agitar fluidos con viscosidades altas,

aproximadamente 100 000 cP; el bioplástico en la etapa de polimerización se comporta como un fluido no newtoniano pseudoplástico, ya que su viscosidad varía con la temperatura y tensión cortante aplicada [\[11\]](#).

Análisis de agua residual no doméstica: de acuerdo con la [Tabla 6](#), se evidencia que la muestra de agua analizada no cumple con los parámetros de pH, DBO₅ y DQO del artículo 13 de la Resolución 0631 de 2015 para el vertimiento de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes [\[28\]](#), dado que aún se está descomponiendo el bioplástico; sin embargo, el índice de biodegradabilidad obtenido entre la relación de DBO₅/DQO fue de 0,59, el cual se interpreta dentro de los siguientes rangos: si DBO₅/DQO > 0,4 indica que el agua residual es muy biodegradable, mientras que si DBO₅/DQO < 0,4 el agua residual es medianamente biodegradable, y si DBO₅/DQO < 0,2 el agua residual es poco biodegradable o no es biodegradable. Por estas razones, se puede concluir que a pesar de que la muestra inicial del agua residual donde se está degradando el bioplástico no cumple los parámetros normativos para vertimientos, ésta tiene un alto índice de biodegradabilidad DBO₅/DQO, lo que indica una significativa biodegradabilidad del bioplástico en el medio acuático durante el periodo evaluado, considerando estas aguas residuales muy biodegradables de acuerdo al informe emitido por el laboratorio, por lo que no es necesario un tratamiento adicional de estas aguas [\[28\]](#).

Para poder determinar el tiempo que toma en degradarse el bioplástico y disminuir los parámetros de DQO y DBO₅, se hace necesario realizar análisis periódicos del agua residual.

Tabla 6. Resultados del análisis del agua residual producto de la degradación de bioplástico.

Parámetro	Unidades	Valor límite permisible Res. 0631 de 2015	Resultados de Laboratorio
pH	Und de pH	6,00 a 9,00	4,45 / 14,1
DBO ₅	mg O ₂ /L	125	>2635
DQO	mg O ₂ /L	300	4452
Sólidos totales	mg/L	---	2636
Biodegradabilidad del agua residual	---	---	0,59 El agua residual es muy biodegradable.

Nota: Resultados suministrados por laboratorio del Centro de Calidad de Aguas de la Universidad de Los Llanos [\[24\]](#).

Pruebas mecánicas

Prueba de tensión: para la película de bioplástico del tratamiento T1 con 10 %p de glicerina, el promedio de la carga máxima fue de 20 N y el esfuerzo máximo de 0,3 MPa, con un punto de ruptura de 19 N [29]; en la [Figura 5](#) se evidencia la prueba en el equipo SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X desplazando la mordaza móvil a una velocidad controlada de 50 mm/min hasta la falla. Los plásticos convencionales como el HDPE tienen un rango de resistencia de 20-30 MPa, lo que los hace más flexibles, con menor rigidez, e ideales para tuberías; mientras que los bioplásticos como el PLA con una resistencia de 60 - 70 MPa, son adecuados para aplicaciones donde se requiera estabilidad, como los cubiertos desechables [30]. Por ello, se puede concluir que la película de bioplástico del tratamiento T1 con una resistencia de 0,3 MPa es flexible, ideal para utilizarse en materiales de corta duración como bolsas o películas de alimentos, por su baja resistencia. Para poder incrementar la resistencia de este bioplástico se hace necesario incluir en la formulación fibras naturales como las de corona de piña, cáscaras de mango, residuos de café, entre otros, que permiten mejorar su resistencia mecánica [31].



Figura 5. Desplazamiento de la mordaza móvil a una velocidad controlada de 50 mm/min hasta la falla.

Prueba de dureza: para la película del bioplástico del tratamiento T1 con 10 %p de glicerina, el valor promedio de dureza fue de 27,5 Shore A [27]; en la [Figura 6](#) se evidencia el instrumento utilizado para medir en la escala SHORE A para materiales blandos.



Figura 6. Dureza Shore A.

Este resultado indica que esta película de bioplástico corresponde a un material relativamente blando, con propiedades similares a las de una goma o elastómero flexible, lo que lo hace ideal para productos flexibles [32]. La variación de la cantidad de glicerina otorga diferentes propiedades al bioplástico, por lo que para productos que requieran más rigidez que elasticidad, como los platos desechables, utilizar una menor concentración de glicerina sería ideal, mientras que para productos como películas para cubrir alimentos, una mayor concentración de glicerina permitiría obtener una película elástica [31].

Se sugiere para futuros ensayos poder correlacionar todos los tratamientos para analizar la tensión y dureza en función de la variación de la concentración de la glicerina y la adición de sustancias de refuerzo como fibras naturales.

Métrica Green Star: Se evaluó cada principio de la química verde para el proceso de producción de bioplástico y producción de plástico convencional, tal como se evidencia en la [Tabla 7](#), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Durante el proceso de producción de bioplástico a partir de almidón de yuca no se generan residuos, no se utilizan reactivos en exceso o se forman coproductos; el ácido acético grado alimentario al 99 % representa un riesgo moderado para la salud humana durante su manipulación, presentando los pictogramas GHS02 como producto inflamable categoría 3 y GHS05 como producto corrosivo categoría 1A, por lo que no está clasificado

como peligro para el medio ambiente acuático; se maneja una temperatura de proceso inferior a los 100 °C y presión ambiental; la materia prima y los insumos son de fuentes renovables de origen vegetal; el proceso se realiza en un solo paso; no se emplean catalizadores; y todas las sustancias utilizadas son degradables y representan un bajo riesgo de accidentes químicos [11,18].

Por otro lado, el proceso de producción de plástico convencional (como por ejemplo la producción de polipropileno), se realiza mediante el método de polimerización del propileno en fase gaseosa; se generan residuos sólidos de los catalizadores gastados en el proceso de polimerización, los cuales contienen trazas de metales como titanio, zirconio o aluminio, que deben ser neutralizados mediante un tratamiento especializado ya que son tóxicos para los ecosistemas; se forman coproductos secundarios

como hidrocarburos ligeros como el propano o etano; el propileno presenta los pictogramas H220 de gas extremadamente inflamable, H280 ya que está contenido a presión y puede explotar si se calienta y H336 que puede provocar somnolencia o vértigo. En el proceso se emplean sustancias auxiliares como cocatalizadores para activar eficientemente el catalizador principal, tales como el trietilaluminio (TEA) y el dietilaluminio cloruro, que representan un riesgo ambiental por su reactividad y requieren neutralización; el proceso de producción del polipropileno se realiza entre 15 a 30 atmósferas de presión y temperaturas de 70 a 90 °C; no se emplean materias primas renovables; y después de la polimerización se pueden emplear derivatizaciones para modificar las propiedades del polímero, estas sustancias empleadas deben tratarse para su degradación y representan un alto riesgo de accidentes químicos [33,34].

Tabla 7. Resultados de la comparación de principios de la química verde en la producción de bioplástico y plástico.

Ítem	Principio	Puntuación	Criterio	Puntuación Final Bioplástico	Puntuación Final Plástico
1	Prevención de residuos	1	Formación de al menos un residuo que suponga un alto riesgo para la salud y el medio ambiente.	3	1
		2	Formación de al menos un residuo que implica peligro moderado para la salud y el medio ambiente.		
		3	Todos los residuos son inofensivos.		
2	Economía Atómica	1	Reacciones con exceso de reactivos (>10 %) y formación de coproductos.	3	1
		2	Reacciones sin exceso de reactivos (≤10 %) y con formación de coproductos; Reacciones con exceso de reactivos (>10 %) y sin formación de coproductos.		
		3	Reacciones sin exceso de reactivos (≤10 %) y sin formación de coproductos.		
3	Síntesis química menos peligrosa	1	Al menos una de las sustancias involucradas presenta un alto peligro para la salud y el medio ambiente.	2	1
		2	Las sustancias involucradas presentan un peligro moderado para la salud y el medio ambiente.		
		3	Todas las sustancias involucradas son inofensivas.		
5	Disminución del uso de disolventes y auxiliares más seguros	1	Al menos uno de los disolventes o una de las sustancias auxiliares utilizadas implica un alto riesgo para la salud y el medio ambiente.	3	1
		2	Los disolventes y sustancias auxiliares utilizados suponen un peligro moderado para la salud y el medio ambiente.		
		3	Los disolventes y sustancias auxiliares no existen o son inofensivos.		

Ítem	Principio	Puntuación	Criterio	Puntuación Final Bioplástico	Puntuación Final Plástico
6	Diseño de la eficiencia energética	1	Presión diferente a la ambiental y/o temperatura > 100 °C o inferior a 0 °C.	2	1
		2	Presión y temperatura ambiental entre 0 y 100 °C que impliquen refrigeración o calefacción.		
		3	Temperatura y presión ambientales.		
7	Uso de materias primas renovables	1	Ninguno de los reactivos/materias primas involucrados es renovable, el agua no se considera.	3	1
		2	Al menos uno de los reactivos/materias primas involucrados es renovable, no se considera agua.		
		3	Todos los reactivos/materias primas involucradas son renovables.		
8	Reducir derivados	1	Se utilizan múltiples derivatizaciones o más de dos pasos.	3	1
		2	Sólo se utiliza una derivatización o dos pasos.		
		3	Sin derivatizaciones o con un solo paso.		
9	Catálisis	1	Utilizan catalizadores que suponen un alto riesgo para la salud y el medio ambiente.	3	1
		2	Se utilizan catalizadores que suponen un peligro moderado para la salud y el medio ambiente.		
		3	No se utilizan catalizadores o los catalizadores son inofensivos.		
10	Diseñar sustancias biodegradables	1	Al menos una de las sustancias involucradas no es degradable y no puede tratarse para su degradación con productos de degradación inofensivos.	3	1
		2	Todas las sustancias involucradas que no sean degradables pueden ser tratadas para obtener su degradación con productos de degradación inofensivos.		
		3	Todas las sustancias involucradas son degradables con productos de degradación inofensivos.		
12	Químicos seguros para prevenir accidentes	1	Las sustancias involucradas presentan un alto riesgo de accidentes químicos.	3	1
		2	Las sustancias involucradas presentan un peligro moderado de accidentes químicos.		
		3	Las sustancias involucradas presentan un bajo riesgo de accidentes químicos.		
PUNTUACIÓN FINAL				28	10

Nota: ajustada con la información suministrada por los autores Ribeiro, Yunes y Machado [19] sobre la evaluación de la métrica holística de la estrella verde de forma semicuantitativa.

En la [Tabla 7](#) se puede evidenciar que el proceso de producción de bioplástico obtuvo 28 puntos de 30 posibles, lo que indica un verdor químico del 90 % reflejado en el diagrama radar de la [Figura 7a](#),

mientras que el proceso de producción del plástico convencional (como el polipropileno) obtuvo 10 puntos de 10 mínimos posibles a obtener, lo que indica un 0 % de verdor químico, como se puede

observar en el diagrama radar de la [Figura 7b](#). En el diagrama radar de estrella, se puede evidenciar de manera independiente el resultado de la evaluación de cada principio de la química verde, evidenciando visualmente el verdor químico de la estrella obtenida mediante la métrica Green Star semicuantitativa. Se puede inferir que el proceso de producción de bioplástico es un proceso recomendable al tener un verdor químico elevado, que genera un impacto positivo en la generación de productos que reducen el riesgo ambiental y a la salud humana.

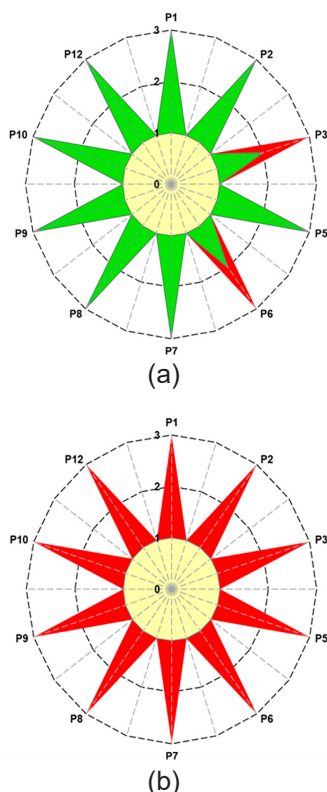


Figura 7. Estrella verde de producción de bioplástico (a) comparada con la de producción de plástico (b).

Conclusiones

En conclusión, existe una correlación entre la concentración de la glicerina y las propiedades finales del bioplástico, donde al aumentar la concentración de glicerina durante la fase de polimerización, hay una disminución de la viscosidad de 83 695 a 28 068 cP a 10rpm con husillo R4. Por otro lado, en el proceso de secado para obtener las películas, al aumentar los tiempos de 12 a 45 horas, se obtuvieron películas con mayor elasticidad, lo que se ratifica con la prueba

mecánica realizada al tratamiento T1 con 10 % de glicerina, donde se obtuvo una tensión de 0,30 MPa y dureza de 27,5 SHORE A, identificando el material como flexible.

En cuanto a la biodegradabilidad de este bioplástico, se requiere realizar más estudios para determinar el tiempo que tarda este material en degradarse en medio acuático, así como en lograr la disminución de la DQO y DBO₅ para el cumplimiento del valor límite permisible según la Resolución 0631 de 2015 de vertimientos; no obstante, se obtuvo un indicador de biodegradabilidad de 0,59 el cual muestra que el agua residual tomada de la degradación del bioplástico tiene un alto índice de biodegradabilidad, por lo que no requiere tratamientos adicionales en el proceso de degradación.

Con esta investigación se logró evidenciar que la producción de bioplástico a partir de fuentes renovables como el almidón de yuca representa una oportunidad para aportar en la disminución del impacto ambiental del uso del plástico convencional, siendo un proceso con un 90 % de verdor químico. Sin embargo, para elaborar un producto final, es necesario identificar la flexibilidad y resistencia que se desea obtener, por lo que se sugiere realizar las pruebas de tensión y dureza aplicadas al producto en desarrollo, variando la cantidad de glicerina, así como involucrar fibras naturales en el proceso para fortalecer la estructura del bioplástico.

Referencias

- [1] Barrera D, Márquez MA, Yergres JF, Navas PC. Producción de plástico parcialmente degradable con polietileno de alta densidad (PEAD) y la dextrina del desecho de *Solanum tuberosum*. Química Viva. 2023;12(1):27-38.
- [2] United Nations Environment Programme. Plastic pollution [Internet]. UNEP. Disponible en: <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/>. Acceso el 18 noviembre de 2024.
- [3] Sarria-Villa RA, Gallo-Corredor JA. La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. Jou. Cie. Ing. 2016;8(1):21-27.
- [4] INCyTU. Plásticos en los océanos. Ciudad de México, México: Oficina de Información científica y tecnológica para el congreso de la Unión; 2019.
- [5] Ley 2232 de 2022 (7 Jul 2022). Congreso de Colombia.

- [6] Universidad EAN. Ley 2232 de 2022: ¡Adiós a algunos plásticos de un solo uso en Colombia! [Internet]. Bogotá: Universidad EAN; 2022. Disponible en: <https://universidadean.edu.co/noticias/ley-2232-de-2022-adios-algunos-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia> Acceso el 18 de noviembre 2024.
- [7] Quevedo Torres NK, Vélez Buitrago JP, Guzmán Criollo LS, Castro Vásquez KD, Sánchez Chaverra P, Sanabria Borda HS, *et al.* Informe Empresa Pública Empoaguas E.S.P.: Impacto de los plásticos convencionales de un solo uso que más contaminan el medio ambiente en el municipio de San José del Guaviare. Informe técnico. San José del Guaviare, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Regional Guaviare – SENNOVA; 2024. Proyecto SGPS-12606-2024.
- [8] Quevedo Torres NK, Vélez Buitrago JP, Guzmán Criollo LS, Castro Vásquez KD, Sánchez Chaverra P, Sanabria Borda HS, *et al.* Recicladores de oficio: impacto de los plásticos convencionales de un solo uso que más contaminan el medio ambiente en el municipio de San José del Guaviare. Informe técnico. San José del Guaviare, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Regional Guaviare – SENNOVA; 2024. Proyecto SGPS-12606-2024.
- [9] Rivera MA, Palma RR. Obtención de bioplástico a partir de desechos agrícolas. Una revisión de las potencialidades en Ecuador. Av. Quím. 2018;13(3):69-78. <https://doi.org/10.53766/AVANQUIM/2018.13.03.04>
- [10] Cánovas Ortega MC. Comparación de la huella de carbono de plásticos reciclables y bioplásticos con aplicaciones en plasticultura (tesis de maestría). Cartagena, Colombia: Universidad Pontificia de Cartagena; 2021.
- [11] Holguin Cardona JS. Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa (tesis de grado). Bogotá D.C, Colombia: Fundación Universidad de América.; 2019.
- [12] Villada HS, Acosta HA, Velasco RJ. Investigación de Almidones Termoplásticos, Precursores de Productos Biodegradables. Inf. Tecnol. 2008;19(2):3-14. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642008000200002>
- [13] Duarte Betancur JS, Granada Sacristán FH. Obtención de un bioplástico a partir de cascarilla de café (tesis de grado). Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América; 2024.
- [14] Avallán A, Díaz D, Mendoza A, Zambrano M, Zamora Y, Riera MA. Obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz (*Zea mays L.*). Rev. Colón cienc. tecnol. y neg. 2020;7(1):1-11. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v7n1a1>
- [15] Diyana ZN, Jumaidin R, Selamant MZ, Ghazali I, Julmohammad N, Huda N, *et al.* Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: A Review. Polymers. 2021;13(9):1396. <https://doi.org/10.3390/polym13091396>
- [16] Surendren A, Mohanty AK, Liu Q, Mirsa M. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. Green Chem. 2022;24:8606-8636. <https://doi.org/10.1039/D2GC02169B>
- [17] Ecoembes. ¿Sabes cuánto tarda una bolsa biodegradable en degradarse? [Internet]. Ecoembes; 2022. Disponible en: <https://reducereutilizarecicla.org/cuanto-tarda-una-bolsa-biodegradable-en-degradarse/>. Acceso el 1 de diciembre 2024.
- [18] Meza Ramos P, Quipuzo Ushñahua L, Meza Contreras V. Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad: proyecto de laboratorio. Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM. 2019;22(43):67-80.
- [19] Cornejo Reyes GV, Marino-Orantes EA, Fuentes-Guadrón CR, Toruño PJ. Biopolímeros para uso agro industrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termo plástico biodegradable. Rev. iberoam. bioecon. cambio clim. 2020;6(11):1359-1382. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>
- [20] Perez Goncalves F, Yubes SF, Guaita RI, Marquez CA, Pires T CM, Pinto JRM, *et al.* La dimensión ambiental de la experimentación en la enseñanza de la química: consideraciones sobre el uso de la métrica holística “estrella verde”. Educ. quím. 2017;28(2):99-106. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.11.005>
- [21] Ribeiro MGTC, Yunes SF, Machado AASC. Assessing the greenness of chemical reactions in the laboratory using updated holistic graphic metrics bases on the globally harmonized system of classification and labeling of chemicals. J. Chem. Educ. 2014;91(11):1901-1908. <https://doi.org/10.1021/ed400421b>

- [22] Anastas PT, Heine LG, Williamson TC. *Green Chemical Syntheses and Processes*. Washington (DC), US: American Chemical Society; 2000. <https://doi.org/10.1021/bk-2000-0767>
- [23] Anitha R, Jayakumar K, Vijay Samuel G, Esther Joice M, Sneha M, Sathya Seeli D. Synthesis and Characterization of Starch-Based Bioplastics: A Promising Alternative for a Sustainable Future. *Eng. Proc.* 2024;61(1):30. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061030>
- [24] ASTM International. Standard test method for rubber property—durometer hardness. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015. ASTM D2240-15.
- [25] International Organization for Standardization. ISO 7619-1:2010. Rubber, vulcanized or thermoplastic—determination of indentation hardness—Part 1: durometer method (shore hardness). Ginebra: International Organization of Standardization; 2010.
- [26] Vera Cuaces AF, Chavez Moreira WL, Carrillo Anchundia BJ. Obtención de polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca. *MQR Investig.* 2023;7(1):2680-2700. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.2680-2700>
- [27] Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. *InfoStat*, versión 2020. Córdoba (AR): Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Centro de Transferencia InfoStat; 2020.
- [28] Torres Mora MA. Informe técnico de caracterización fisicoquímica de agua residual no doméstica (ARnD) para SENA Regional Guaviare. Informe Técnico. Villavicencio, Colombia: Universidad de Los Llanos, Centro de Calidad de Aguas (CCA); San José del Guaviare, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Guaviare – SENNOVA; 2024. Proyecto SGPS-12606-2024
- [29] Pineda Hernández YA, Romo S. Informe de pruebas mecánicas en biopolímeros Sennova. Informe Técnico. Medellín, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo; San José del Guaviare, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Guaviare – SENNOVA; 2024. Proyecto SGPS-12606-2024.
- [30] Estrada Monje A, Silva Goujon MA, Rodriguez Sanchez I, Conejo Dávila AS, Piñón Balderrama CI, Zaragoza Estrada A, *et al.* Effect of the Addition of PLA on the Thermal and Mechanical Properties of Reprocessed HDPE. *Polymers.* 2024;16(16):2387. <https://doi.org/10.3390/polym16162387>
- [31] Francisco Ponce BA, Vidal Silva IM, Maldonado Astudillo YI, Jimenez Hernandez J, Flores Casamayor V, Arambula Villa G, *et al.* Efecto de la adición de subproductos agroindustriales en las propiedades físicas de un bioplástico almidón-gelatina. *Biotecnia.* 2021;23(1):52-61. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.1324>
- [32] Getino L, Marín JL, Chamizo Ampudia A. A Review of Polyhydroxyalkanoates: Characterization, Production, and Application from Waste. *Microorganisms.* 2024;12(10):2028. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102028>
- [33] Guezara JL, Quijada R, Saavedra P, Palza H, Galland GB. Estudio de la polimerización de propeno utilizando diferentes catalizadores metallocenos. *Bol. Soc. Chil. Quím.* 2002;47(2):81-90. <http://doi.org/10.4067/S0366-16442002000200003>
- [34] Bracho P, Nicolino A. Evaluación de tamices moleculares en la purificación de propileno utilizado en la producción de polipropileno. *Ingeniería UVM.* 2010;4(2):175-195 .