



**Somos calidad,
somos USC**

Obtención de biopelículas de almidón de yuca mejoradas con oxido de titanio e indicadores naturales

Autores

**Alexis Camacho Piedrahita
Nicolas Vivas Arango**

**Título por el que opta:
Químico**

Director

Ms. Sandra Patricia Castro Narváz

Grupo de Investigación

Grupo de investigación de electroquímica y medio ambiente (GIEMA)

**Línea de Investigación
Electroquímica y Nuevos materiales**

**Facultad de Ciencias Básicas
Química**

**Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

TITANIO E INDICADORES NATURALES IMPACTOS

A continuación, se presentan los impactos identificados en el desarrollo del trabajo de grado:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Desarrollo de biopelículas a base de almidón de yuca como alternativa de bajo costo frente a plásticos derivados del petróleo.	Industria alimentaria, productoras de empaques, sector agrícola productor de yuca.
Responsabilidad social	Promoción del uso de materiales biodegradables que reducen la contaminación y fomentan hábitos de consumo responsables.	Comunidades locales, consumidores, entidades educativas.
Científico	Generación de nuevo conocimiento sobre la funcionalización de biopolímeros con TiO ₂ y colorantes naturales (antocianinas y curcumina), publicable en revistas científicas.	Comunidad académica, grupos de investigación en química, ciencia de materiales y biotecnología.
Indicadores de Gestión	Avance en proyectos de sostenibilidad universitaria y cumplimiento de metas ambientales asociadas a la economía circular y reducción de plásticos.	Universidad Santiago de Cali, entes reguladores ambientales.
Tecnológico	Obtención de un material inteligente con capacidad de cambio de color frente a variaciones de pH, aplicable en empaques activos.	Industria de empaques, empresas de innovación en nanotecnología y biomateriales.
Técnico	Optimización de formulaciones de biopelículas mediante plastificantes, polímeros celulósicos y nanopartículas de TiO ₂ ; metodologías reproducibles de casting, FTIR, TGA/DSC.	Investigadores, laboratorios de materiales, estudiantes de química e ingeniería.
Ambiental	Sustitución parcial de plásticos no biodegradables, reducción de residuos, aprovechamiento de materias primas renovables (yuca).	Medio ambiente, sociedad en general, entes gubernamentales.
Social	Fortalecimiento de la cadena productiva de la yuca en Colombia, aportando valor agregado y oportunidades para comunidades rurales.	Agricultores, asociaciones campesinas, productores locales.
Cultural	Rescate de prácticas sostenibles y valorización de recursos naturales tradicionales (yuca, cúrcuma, repollo morado) en aplicaciones modernas.	Comunidades locales, sector educativo, cultura ambiental.

OBTENCIÓN DE BIOPELÍCULAS DE ALMIDÓN DE YUCA MEJORADAS CON OXIDO DE TITANIO E INDICADORES NATURALES

Alexis Camacho Piedrahita ¹, Nicolas Vivas Arango ²

¹alexis.camacho00@usc.edu.co; ²nicolas.vivas00@usc.edu.co

Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente (GIEMA).
Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda
Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

El incremento de residuos plásticos a base de petróleo, están desarrollando una crisis de contaminación ambiental que influyen en ecosistemas hídricos y terrestres que hacen pertinentes la búsqueda de nuevas alternativas económicas, segura, sostenibles para aplicaciones de envases tipo bolsas que disminuyan la huella de carbono. Este trabajo presenta el desarrollo de biopelículas de almidón de yuca reforzadas con dióxido de titanio, polímeros celulósicos y plastificantes, incorporando antocianinas y curcumina como indicadores de pH. Se elaboraron por método casting y se caracterizaron mediante ensayos mecánicos, FTIR con KBr y HATR, y análisis térmicos (DSC/TGA). Los resultados mostraron un incremento en la resistencia a la tracción de 7,0 N/cm² (PC3) a 17,0 N/cm² (2A), valor cercano al polietileno de alta densidad (20-30 N/cm²). La absorción de agua varió entre 7,52% y 24,8%, frente a <0,01% del HDPE, confirmando la naturaleza hidrofílica del almidón. Los espectros FTIR presentaron bandas de polisacáridos (O-H 3400 cm⁻¹, C-O-C 1020 cm⁻¹) y señales Ti-O (500-700 cm⁻¹), confirmando la incorporación de TiO₂. Los análisis térmicos evidenciaron estabilidad hasta 200 °C y degradación entre 201-334 °C. Finalmente, las películas mostraron virajes cromáticos de pH 1 a 13, validando su aplicación en empaques activos inteligentes.

Palabras claves: Biopelículas de almidón; dióxido de titanio; FTIR; absorción de agua; empaques biodegradables

OBTAINING CASSAVA STARCH BIOFILMS ENHANCED WITH TITANIUM OXIDE AND NATURAL INDICATORS

Abstract

The increase in petroleum-based plastic waste is causing an environmental pollution crisis that affects aquatic and terrestrial ecosystems, making it necessary to search for new economical, safe, and sustainable alternatives for bag-type packaging applications that reduce the carbon footprint. This work presents the development of cassava starch bioplastics reinforced with titanium dioxide, cellulosic polymers, and plasticizers, incorporating anthocyanins and curcumin as pH indicators. They were produced by casting and characterized by mechanical testing, FTIR with KBr and HATR, and thermal analysis (DSC/TGA). The results showed an increase in tensile strength from 7.0N/cm² (PC3) to 17.0 N/cm² (2A), a value close to that of high-density polyethylene (20-30 N/cm²). Water absorption varied between 7.52% and 24.8%, compared to <0.01% for HDPE, confirming the hydrophilic nature of starch. The FTIR spectra showed polysaccharide bands (O-H 3400 cm⁻¹, C-O-C 1020 cm⁻¹) and Ti-O signals (500-700cm⁻¹), confirming the incorporation of TiO₂. Thermal analyses showed stability up to 200 °C and degradation between 201-334 °C. Finally, the films showed color changes from pH 1 to 13, validating their application in smart active packaging.

Keywords: Starch-based biopolymer films; titanium dioxide; FTIR; water absorption; biodegradable packaging

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías sostenibles en el ámbito del envasado de alimentos ha cobrado una importancia creciente debido a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria, reducir el impacto ambiental y responder a las demandas de consumidores cada vez más conscientes. Tradicionalmente, los envases han cumplido funciones esenciales como la protección física, la conservación de la higiene y la prolongación de la vida útil de los productos. Sin embargo, los avances en ciencia de materiales han permitido la evolución hacia empaques inteligentes, capaces de interactuar con el entorno y proporcionar información sobre el estado del alimento envasado con sensores fisicoquímicos (Halonen et al., 2020).

Los termoplásticos derivados del petróleo, como el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET), dominan actualmente el mercado de empaques, representando más del 90% de los residuos plásticos generados a nivel global (Frączak et al., 2021). Su lenta degradación y acumulación en el medio ambiente han generado una crisis ecológica que exige soluciones urgentes. En contraste, los bioplásticos, especialmente aquellos derivados de fuentes vegetales como el almidón, ofrecen una alternativa más sostenible (Mori, 2023). No obstante, estos materiales presentan limitaciones técnicas, como baja resistencia mecánica, sensibilidad térmica y limitada estabilidad frente a la humedad, que deben ser superadas para su aplicación efectiva (Ahmed et al., 2023a).

Para abordar estas deficiencias, se han incorporado materiales inteligentes, definidos como compuestos capaces de responder a estímulos externos mediante cambios en sus propiedades (Vicente Vanegas-Useche, 2004). Entre ellos, los óxidos metálicos como el dióxido de titanio (TiO_2) destacan por su estabilidad térmica, propiedades antimicrobianas, capacidad de absorción de rayos UV y su función como fotocatalizador (Poudel et al., 2023). Estas características permiten mejorar la resistencia, elasticidad y durabilidad de las películas, al tiempo que contribuyen a la conservación de los alimentos al descomponer compuestos como el etileno, responsable de la maduración acelerada de frutas (Gusain et al., 2019).

El almidón de yuca, por su parte, representa una materia prima estratégica en Colombia, tanto por su disponibilidad como por su potencial industrial y su valor nutricional. Debido a esto, es una materia prima utilizada desde la fabricación de papel y adhesivos, hasta el sector alimenticio como harina de yuca, espesantes de sopas y en la fabricación de salsas (Verde, 2023). La yuca (*Manihot esculenta*), cultivada ampliamente en regiones tropicales del país, es una fuente renovable y económica de almidón. A pesar de que la mayor parte de la producción nacional se destina a la yuca común, la yuca industrial ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsado por políticas gubernamentales orientadas a la reforma agraria y al aprovechamiento de tierras baldías. Este enfoque no solo promueve el desarrollo rural, sino que también fortalece cadenas productivas asociadas, como la agricultura, el transporte y la industria de fertilizantes (Cardona, 2019).

Este proyecto hace aportes al desarrollo de una película biodegradable a base de almidón de yuca, reforzada con dióxido de titanio, material celulósico e indicadores naturales de pH, como las antocianinas extraídas de tubérculos como el repollo morado y la curcumina presente en la cúrcuma, los cuales aportan una funcionalidad adicional al actuar como sensores visuales (Fortich et al., 2017). La combinación propende a aportar en la industria de termoplásticos convencionales, brindando al material biodegradable propiedades mecánicas competitivas con propiedades funcionales avanzadas, como la capacidad de detectar cambios en el ambiente protónico.

El dióxido de titanio (TiO_2) ha sido ampliamente estudiado como refuerzo en matrices poliméricas biodegradables debido a sus propiedades multifuncionales. Este óxido metálico, en su fase anatasa, presenta una elevada estabilidad térmica, resistencia química y notables capacidades fotocatalíticas, características que favorecen su incorporación en sistemas destinados al envasado de alimentos (Phothisarattana et al., 2021). La adición de TiO_2 no solo mejora las propiedades mecánicas y ópticas de las biopelículas, sino que también confiere efectos antimicrobianos y de absorción de radiación ultravioleta, extendiendo la vida útil de los productos envasados y reduciendo riesgos de degradación fotoquímica. De esta manera, el uso de TiO_2 en combinación con biopolímeros como el almidón representa una estrategia prometedora en el diseño de empaques activos e inteligentes (Iacovone et al., 2023).

En el caso de las biopelículas amiláceas, el uso de plastificantes constituye un aspecto determinante en el logro de un material funcionalmente viable. Estos aditivos, generalmente compuestos de bajo peso molecular y alta

afinidad por las cadenas poliméricas, se incorporan con el objetivo de reducir la cristalinidad y aumentar la movilidad molecular dentro de la matriz (Mari et al., 2023). El glicerol y el sorbitol se destacan como los plastificantes más empleados en sistemas a base de almidón, ya que permiten obtener películas más flexibles, menos quebradizas y con mejor procesabilidad. No obstante, la concentración de plastificante debe optimizarse, pues un exceso puede ocasionar fenómenos de retrogradación, migración hacia la superficie y un incremento de la permeabilidad al agua, comprometiendo la integridad y funcionalidad del material en condiciones reales de almacenamiento (Ballesteros-Martínez et al., 2020)

Por su parte, los materiales celulósicos, en particular la metilcelulosa y la carboximetilcelulosa, han demostrado un elevado potencial como refuerzos estructurales en biopelículas. Gracias a su alta cristalinidad, módulo elástico y abundancia de grupos hidroxilo, estas fibras se integran eficientemente con matrices de almidón mediante enlaces de hidrógeno, mejorando la cohesión intermolecular (Šimkovic et al., 2023) La incorporación de fracciones de metilcelulosa favorece un incremento de la resistencia mecánica y una reducción significativa en la permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua, propiedades críticas en aplicaciones de envasado. Adicionalmente, su origen renovable y su biodegradabilidad refuerzan el carácter sostenible de estas formulaciones, consolidando su papel como aditivos estratégicos en el desarrollo de biopelículas avanzadas (Shanbhag et al., 2023)

En consecuencia, este trabajo se orienta a definir y analizar los criterios composicionales que gobiernan la modificación de películas de almidón de yuca mediante la incorporación de dióxido de titanio e indicadores naturales de pH, con el propósito de establecer relaciones estructura-propiedad que permitan obtener materiales con comportamiento fisicoquímico, mecánico y funcional adecuado para su potencial aplicación como insumo en la fabricación de empaques biodegradables. Bajo este enfoque, la investigación busca responder la siguiente pregunta central: ¿Cuáles son los criterios composicionales más adecuados para la modificación de películas de almidón de yuca con dióxido de titanio e indicadores de pH naturales que permitan presentar propiedades fisicoquímicas y mecánicas apropiadas como insumo para la fabricación de empaques? La resolución de este interrogante permite identificar la influencia relativa de los componentes orgánicos e inorgánicos sobre la organización de la matriz polimérica, la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la respuesta funcional del material, contribuyendo al diseño racional de biopelículas con prestaciones comparables a sistemas poliméricos convencionales y alineadas con los principios de sostenibilidad y economía circular.

2. MATERIALES Y METODOS

Reactivos

El almidón de yuca se obtuvo comercialmente (Marca Rendidor). Glicerol (Agenquímicos), alcohol polivinílico (Merck), óxido de titanio (Merck). Cúrcuma (extracción de raíz), Colorantes naturales indicadores de pH (se extraen de repollo morado, (*Brassica oleracea*). Las soluciones se prepararon con agua tipo 1 (conductividad 18 μ S/cm).

Obtención extractos colorantes naturales

- *Extracción de curcuminoides de la cúrcuma (colorante natural)*

Se realizó lavado exhaustivo de la raíz de cúrcuma, seguido de una desinfección con una solución de agua e hipoclorito de sodio al 1%, además de un enjuague completo. La extracción se efectuó mediante el método de Soxhlet, utilizando etanol. Se colocó la cúrcuma en un cartucho cilíndrico poroso y se añadió 250 mL de etanol al balón de extracción, calentándolo hasta su ebullición para que el vapor condensado extraiga los compuestos deseados. Este proceso se repitió hasta agotar la muestra. Finalmente, se filtró al vacío el colorante líquido obtenido y se envasó en frascos de color ámbar (Slaček et al., 2023)

- *Extracción de antocianinas (colorante natural) del repollo morado.*

Para extraer el pigmento de la *Brassica Oleracea*, se deshojó y lavó la planta, se desinfectó con una solución de agua e hipoclorito de sodio al 1% con posterior lavado con agua hasta pH neutro. Luego, se trituraron 500 g de *Brassica Oleracea*, se calentó con 500 mL de agua desionizada durante 10 minutos, enfrió y se almacenó en un frasco ámbar (Meng et al., 2025)

Preparación de biopelículas de almidón

Las películas de almidón se prepararon por el método Casting, el cual implica gelatinización a 50°C con 20 mL de agua. Se homogenizaron los sólidos almidón de yuca, metilcelulosa, carboximetil celulosa y dióxido de titanio en agua. A parte, se mezcló glicerol y alcohol polivinílico, cuando los plastificantes alcanzaron una temperatura de 45°C se adicionó la mezcla de sólidos se continuó con el calentamiento hasta alcanzar la gelatinización. La solución homogénea se vertió cuidadosamente sobre una superficie plana y nivelada. Se uso una espátula para distribuirla de manera uniforme y controlar el espesor. La película se dejó secar a temperatura ambiente, durante 24 horas.

Caracterización de las películas

Las pruebas mecánicas se realizaron conforme a la normativa NTC 942:2020 (ICONTEC, 2020), (NTC 942 | PDF | Rendimiento (ingeniería) | Estrés (Mecánica), n.d.). utilizando muestras de dimensiones 2.4 centímetros de ancho por 14.4 centímetros de largo. Las películas fueron sometidas a elongación mediante un dinamómetro (Dinatecc), equipado con una mordaza fija inferior y un móvil superior, operando a una velocidad de 150 milímetros por minuto y con una celda de carga de 25 kg. El rango máximo de elongación fue de 14.4 cm. Se empleó el software (Dinatecc 50500) del dispositivo para la recolección de datos durante el proceso.

El espesor de las películas fue medido de acuerdo con la normativa NTC 870:2008 (ICONTEC, 2008). Se utilizaron 2 micrómetros de la marca Mitutoyo para registrar los datos tanto en micras como en milésimas de centímetro. Las muestras, con una longitud de 14.4 cm, fueron sometidas a 13 mediciones con una separación de 1.0 cm cada una.

La evaluación de la humedad inicial y la capacidad de absorción de agua se efectuó en 3 muestras con un área de 30 cm² cada una. La cantidad de agua absorbida se midió mediante la masa que la película desecada retiene al ser sumergida en agua ionizada tipo uno durante 30s, seguido del retiro de exceso de agua mediante un papel secante.

Adicionalmente, se realizaron análisis de espectroscopía infrarroja por reflectancia total atenuada (ATR-FTIR) un accesorio de reflexión interna horizontal (HATR) y por pastillaje con bromuro de potasio (KBr). Los espectros se registraron en el rango de 4000 a 400 cm⁻¹ con resolución de 4 cm⁻¹, realizando un promedio de 32 barridos por muestra para mejorar la relación señal-ruido. La aplicación de esta metodología permitió identificar de manera más precisa las bandas vibracionales asociadas a los grupos funcionales del almidón, metilcelulosa, carboximetilcelulosa, dióxido de titanio y plastificantes (glicerol y PVA), proporcionando información sobre las interacciones intermoleculares y posibles modificaciones químicas dentro de la matriz polimérica (Schreuders et al., 2021)

Análisis térmico (TGA y DSC)

El comportamiento térmico de las biopelículas se evaluó mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Para ello, se empleó un analizador térmico simultáneo (TA Instruments SDT Q600) bajo atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 mL/min. Las muestras, previamente acondicionadas a temperatura ambiente durante 24 h, se pesaron en un rango de 5 ± 0.2 mg y se colocaron en crisoles de platino. El análisis TGA se realizó en un rango de temperatura de 30 °C a 600 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Este procedimiento permitió determinar la pérdida de masa en función de la temperatura, identificando las etapas de descomposición térmica de los componentes de la película (agua, plastificantes, almidón, celulósicos y TiO₂).

El análisis DSC se llevó a cabo utilizando el mismo equipo y condiciones atmosféricas, en un intervalo de 25 °C a 350 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Se registraron las transiciones térmicas características, como la transición vítrea (T_g), la fusión parcial de zonas cristalinas y los picos endotérmicos o exotérmicos asociados a los procesos de gelatinización, fusión y degradación de los polímeros presentes (Reyes Mendoza, 2024).

Los datos obtenidos se analizaron mediante el software **Universal Analysis 2000** de TA Instruments. A partir de los termogramas se determinaron la temperatura de inicio de degradación, la temperatura máxima de descomposición y el porcentaje de masa residual. Estos resultados permitieron establecer la estabilidad térmica

de las formulaciones, así como la influencia del TiO₂ y los polímeros celulósicos en la mejora de la resistencia térmica de las biopelículas de almidón de yuca.

2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La adición de glicerol y alcohol polivinílico (PVA) a la matriz de almidón de yuca generó una biopelícula con propiedades mecánicas y apariencia con mejores desempeños en comparación con el solo la matriz de almidón. La formación de enlaces de hidrogeno debidas a los plastificantes eleva el módulo elástico y la resistencia a la tracción. Las fuerzas de atracción intermolecular entre los polímeros (almidón y PVA) y el plastificante (glicerol) mejora la homogeneidad y la integridad estructural de la película, resultando un material más fuerte y menos soluble en agua.

La fragilidad observada en las películas con baja concentración de almidón de yuca y sin aditivos se atribuye a la microestructura inherente del polímero. La amilosa, al ser una cadena lineal, exhibe una fuerte tendencia a la alineación y recristalización; este fenómeno, conocido como retrogradación, confiere a la matriz una estructura rígida y quebradiza, lo que se manifiesta como una baja resistencia a la manipulación y la fractura al ser retirada del molde (ENRÍQUEZ C et al., 2012). Para mitigar esta rigidez y aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas, se justificó la adición de los plastificantes glicerol y alcohol polivinílico (PVA). Además de su impacto mecánico, la inclusión de estos aditivos fue crítica para mejorar la apariencia visual de la película. Las formulaciones no optimizadas mostraron la presencia de gránulos no gelatinizados y aglomerados, lo que comprometía la uniformidad del espesor (Figura 1). Estos defectos morfológicos afectan la reproducibilidad de las propiedades de barrera y mecánicas. Si bien el método *casting* es inherentemente capaz de generar películas con alta repetibilidad mediante la optimización de sus componentes (Ahmed et al., 2023b), la eliminación de las heterogeneidades visuales y estructurales fue un prerrequisito para alcanzar un material viable para el desmolde.

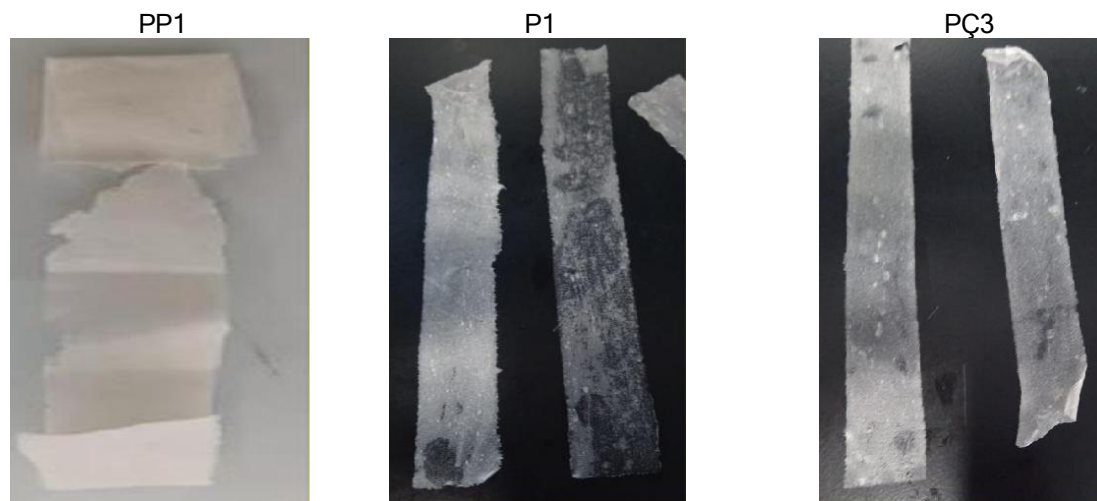


Figura 1. Películas de almidón de yuca con variaciones de alcohol polivinílico y glicerol

PP1: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 % y 0,4 g de carboximetilcelulosa

P1: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %

PC3: Está compuesta por 4,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 % y 0,06 g de dióxido de titanio

La resistencia mecánica preliminar determinada mediante ensayos manuales de tracción establece que concentraciones de almidón de yuca de 20 % (p/v) presenta menores grumosidades o baja compactación. Por otro lado, 2.0g de glicerol por cada 20 ml, mejora la homogeneización de la matriz polimérica. Finalmente, la adición de alcohol polivinílico (PVA), del 10% (p/v) y el reforzamiento con dióxido de titanio (TiO₂) entre el 0.01 % y el 0.05 % (p/v) permitieron obtener películas con mayor resistencia. Las concentraciones finales fueron validadas mediante la cuantificación de sus propiedades mecánicas, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

Tab la 1. Optimización de las películas con la variación de los reactivos.

Película	PVA	TiO ₂ (%)	Resistencia a la tracción (N/m ²)	Tiempo (s)
P1	6%	0.01	7.50	2.0
P2		0.02	4.50	0.5
P3		0.03	7.50	0.5
P4		0.04	10.02	1.0
P5		0.05	9.98	1.0
PD1	8%	0.01	8.25	1.0
PD2		0.02	10.25	2.0
PD3		0.03	9.55	2.0
PD4		0.04	10.25	1.5
PD5		0.05	10.00	1.0
PC1	10%	0.01	7.02	2.0
PC2		0.02	4.75	2.0
PC3		0.03	12.10	4.0
PC4		0.04	10.10	4.5
PC5		0.05	10.98	2.0
PB1	12%	0.01	7,20	4.0
PB2		0.02	9.72	3.5
PB3		0.03	7.85	3.0
PB4		0.04	7.51	3.5
PB5		0.05	7.10	3.0
PA1	13%	0.01	11.12	5.0
PA2		0.02	9.01	3.5
PA3		0.03	10.11	4.0
PA4		0.04	9.51	3.5
PA5		0.05	7.40	6.0

PVA: Alcohol polivinílico

Los resultados de las pruebas mecánicas de tracción (Tabla 1) permitieron identificar la formulación PC3 como el punto de partida óptimo, dado que exhibió la máxima resistencia mecánica dentro de las formulaciones iniciales de almidón-PVA-TiO₂. Con una resistencia aproximada de 12 N/cm², la película PC3 demostró un rendimiento mecánico superior a reportes de biopelículas similares en la literatura (como se evidencia en la Tabla 4). No obstante, es aún un valor bajo con respecto a polímeros convencionales de referencia, como el polietileno de alta densidad (HDPE), cuya resistencia se sitúa en un rango de 200 a 300 N/cm² y en el de baja densidad es de 100N/cm² (Tian et al., 2023). Si bien la formulación PC3 es prometedora en el contexto de materiales biodegradables es pertinente implementar modificaciones para alcanzar propiedades más competitivas.

La adición de carboximetilcelulosa (CMC) y metilcelulosa (MC) se justificó por su capacidad documentada para incrementar la resistencia mecánica, mejorar la flexibilidad y conferir mayor hidrofobicidad a las matrices basadas en almidón (Sun et al., 2022). Específicamente, esta modificación fue diseñada para mitigar la rigidez excesiva y la heterogeneidad estructural (presencia de aglomerados) que caracterizaban a las películas iniciales, defectos que afectaban la uniformidad de espesor y el peso. Partiendo de la formulación base PC3 se desarrollaron nuevas muestras con variaciones de CMC (0.1 % a 0.5 % p/v) y MC (0.02 % a 0.1 % p/v). La evaluación del impacto de estos aditivos en las propiedades mecánicas y su consecuente contribución a la competitividad del material se _detalla en la Tabla 2. Asimismo, la apariencia de las películas 2E y 2A son observables en la Figura 2.

Tabla 2. Tabla de optimización de la CM y CMC, y los resultados de la prueba de resistencia a la tracción.

MC	GLICEROL (g)	PVA (g)	CMC	Película	Resistencia (N/cm ²)	Tiempo (S)
0.02%	2,0	18,0	0.1%	2E	14.50	8.0
0.04%	2,0	18,0	0.2%	2D	15.55	10.0
0.06%	2,0	18,0	0.3%	2C	16.86	10.0
0.08%	2,5	22,5	0.4%	2B	13.43	9.0
0.10%	2,5	22,5	0.5%	2A	17.01	10.0

MC: Metilcelulosa, CMC: Carboximetilcelulosa

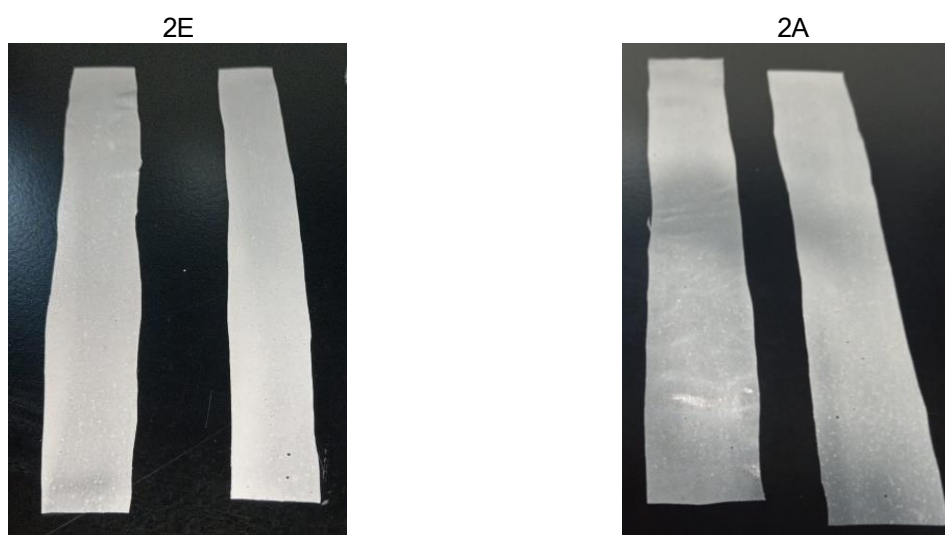


Figura 2. Películas de almidón con carboximetilcelulosa, dióxido de titanio, glicerol, metilcelulosa y alcohol polivinílico.

2E: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,038 g de dióxido de titanio, 0,5 g de carboximetilcelulosa y 0,1 g de metilcelulosa.

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

La CMC y MC mejora en un 42% la resistencia de tracción en comparación con la película PC3, con la cual se había logrado obtener una resistencia de 12 N/cm², con esta nueva modificación la película 2A, se obtuvo una resistencia de 17 N/cm². La diferencia en la resistencia a la tracción entre las distintas formulaciones se debe principalmente a cómo interactúan el almidón, el glicerol, los refuerzos poliméricos y los aditivos inorgánicos. El glicerol funciona como un agente plastificante formando puentes de hidrogeno con los grupos hidroxilos (-OH), del almidón esta interacción tiende a reducir la rigidez de la película aumentando flexibilidad de las cadenas y por ende mejora la resistencia a la tracción como se puede ver en la investigación de (Cedeño Sares et al., 2023).

La presencia de carboximetilcelulosa (CMC), que es un derivado aniónico de la celulosa la cual interactúa con el almidón mediante puentes de hidrogeno y fuerzas electrostáticas entre los grupos carboxilo(-COO-) y los grupos hidroxilos, mejora la estabilidad mecánica y la resistencia a la humedad ya que disminuye los OH disponibles en la matriz lo cual la vuelve menos hidrofílica formando una red polimérica más cohesiva(Qin et al., 2023). Asimismo, la metilcelulosa (MC) aporta grupos metilos(-CH₃) que cambian la polaridad de la celulosa permitiendo su interacción con la matriz de almidón, estas se unen por puentes de hidrogeno y genera mayor transparencia, cohesión y resistencia térmica (Saidi et al., 2025) La interacción con el alcohol polivinílico se debe a que el PVA es un polímero sintético hidrofílico por lo cual logra interactuar fácilmente con el almidón disuelto en agua. Sus

grupos -OH forman puentes de hidrogeno y entrelazamientos físicos con las cadenas del almidón, esto ayuda a obtener una matriz más estable y densa así mismo mejorando la resistencia mecánica, elástica y estabilidad térmica (Garces Vargas et al., 2020). Y por último el dióxido de titanio ingresa como un refuerzo inorgánico, el cual se vincula a la matriz de almidón formando enlaces de coordinación con grupos -OH. Este disminuye la translucidez de la película, pero mejora la resistencia mecánica y crea una barrera contra la radiación UV, pero no compromete la biodegradabilidad de la película(Martínez et al., 2018).

La Tabla 3 permite ver la comparación de 5 formulaciones en cuanto a resistencia de tracción y observaciones físicas de la película.

Tabla 3. Resistencia tracción de películas de almidón con variaciones de carboximetilcelulosa, dióxido de titanio, glicerol, metilcelulosa y alcohol polivinílico.

Muestra	Almidón (g)	Glicerol (g)	PVA (g)	CMC (g)	CM (g)	TiO ₂ (g)	Resistencia tracción (N/cm ²)	Observaciones
PP1	4,000	0	0	0	0	0	N/A	Baja resistencia
P1	4.500	2,500	14,000	0	0	0,0025	7.50	Resistencia media
PC3	4,500	2.500	20,500	0	0	0,060	12.00	Buena resistencia
2E	4,500	2.500	20,500	0,125	0,032	0,060	14.50	Alta resistencia
2A	4,500	2.500	20,500	0,625	0,125	0,060	17.00	Alta resistencia

PVA: Alcohol polivinílico 10%, CMC: Carboximetilcelulosa, CM: Metilcelulosa.

La formulación PP1 exhibió la resistencia mecánica más baja, con características de fragilidad y heterogeneidad estructural (grumosidad y falta de uniformidad) que impidieron la cuantificación mediante pruebas de tracción. Esta extrema fragilidad es coherente con la naturaleza molecular del almidón: la amilosa, compuesta por cadenas lineales, tiende a cristalizar y retrogradar, generando una estructura polimérica rígida y quebradiza con escasa movilidad y flexibilidad (García Salcedo, 2025; Hernández Morales, 2023). La necesidad de mitigar esta rigidez justifica la inclusión de plastificantes.

En contraste, las muestras P1 y PC3 mostraron un comportamiento mecánico superior, correlacionado directamente con la concentración de plastificantes. Se observó que un aumento en la concentración de glicerol y PVA disminuyó las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de almidón, incrementando la movilidad, elongación y maleabilidad de la materia (Hernando et al., n.d.). Esta tendencia se confirmó en el estudio, donde la formulación PC3 (mayor concentración de plastificantes) alcanzó una resistencia de 12.0 N/cm², superando la resistencia de 7.5 N/cm² obtenida por P1 (menor concentración).

Las formulaciones 2A y 2E, que incorporaron agentes celulósicos (CMC y MC), alcanzaron los valores más altos de resistencia a la tracción 17 y 14 N/cm² respectivamente. Esta mejora se debe a la acción del refuerzo estructural proporcionado por la celulosa. La adición de CMC y MC promueve la formación de una red interpenetrante entre las nanofibras de celulosa y las cadenas de almidón. La interacción intermolecular, particularmente a través de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo, incrementa la cohesión interna y facilita una distribución más eficiente de las cargas mecánicas a través de la matriz (Lomelí-Ramírez et al., 2024). Aunque esta fortificación indujo una ligera disminución en la elongación a la rotura (reflejando un aumento en la rigidez), el incremento en la capacidad del material para soportar esfuerzos antes de la fractura es un atributo deseable para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional. En suma, los resultados confirman el rol de la celulosa como un agente

reforzante altamente eficaz, que optimiza la resistencia estructural de la biopelícula sin comprometer su biodegradabilidad final (Hoek et al., 2024).

La mejora estructural y el desempeño mecánico de las formulaciones optimizadas, particularmente en 2A y 2E se atribuyen también a la interacción sinérgica generada por la inclusión de dióxido de titanio. Debido a su elevada área superficial y alta polaridad, el TiO_2 establece interacciones secundarias fuertes, como enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, con los grupos hidroxilo presentes tanto en las cadenas de almidón como en las fibras celulósicas (Agustin et al., 2017). Esta intensa interacción a nivel molecular facilita una dispersión más eficiente del óxido metálico, lo que resulta en una mayor densificación del sistema y una reducción de la porosidad.

Como consecuencia de esta densificación, se observó un aumento en la opacidad y una mejora en las propiedades mecánicas. Se postula que el TiO_2 actúa como un agente nucleante, promoviendo una organización más ordenada de las cadenas poliméricas, lo que se traduce en un mejor módulo de elasticidad y resistencia a la tracción (Nagaoka et al., 2019). Las interacciones moleculares postuladas entre el almidón, los plastificantes y el TiO_2 se ilustran conceptualmente en la Figura 3.

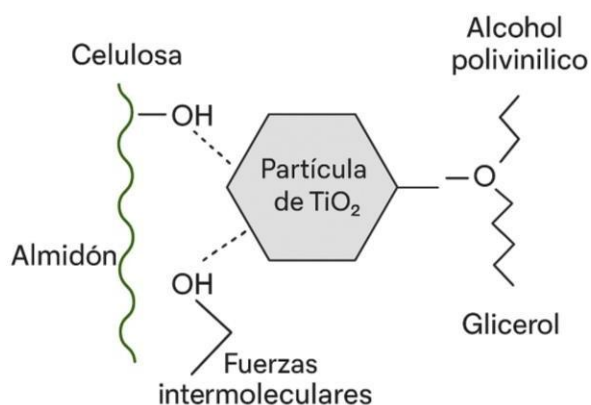


Figura 3. Interacción de los reactivos en la formación de las películas.

A pesar de que las resistencias obtenidas en esta investigación (17 N/cm^2) son ligeramente inferiores a los valores reportados en otros estudios con sistemas similares, como el de (Pormsila et al., 2025), quienes alcanzaron 21.54 N/cm^2 esta diferencia es deliberada. El valor superior de pormsila et al. se logró mediante la utilización de concentraciones significativamente altas de plastificantes y TiO_2 . El enfoque de nuestra investigación, sin embargo, prioriza la viabilidad y competitividad económica del material biodegradable. La utilización de dosis elevadas de aditivos de alto costo habría comprometido la rentabilidad, haciendo que la película resultante fuese poco competitiva frente a las alternativas plásticas convencionales.

El análisis de las curvas fuerza-tiempo obtenidas durante la prueba de resistencia a la tracción (Figura 4) permitió inferir la influencia directa de los aditivos y refuerzos en la estructura polimérica. Las muestras PP1, PB5 y PA5 presentaron un comportamiento frágil, caracterizado por una curva corta con una ruptura temprana que alcanzó fuerzas máximas cercanas a los 8 N/cm^2 antes de la fractura. Este perfil es indicativo de una baja cohesión interna y una escasa capacidad de disipación de energía, tal como se predijo por la falta de plastificación efectiva.

En marcado contraste, las formulaciones optimizadas, 2E y 2A, exhibieron una curva ascendente de resistencia sostenida en un tiempo prolongado. Estos materiales alcanzaron resistencias máximas de aproximadamente 17 N/cm^2 , lo que refleja una adecuada interacción entre la rigidez aportada por la matriz reforzada y la ductilidad necesaria para soportar el esfuerzo (Zupanc et al., 2024).

Es importante señalar que la resistencia mecánica de estas biopelículas es inherentemente variable en la literatura, con un rango reportado que oscila típicamente entre $6 - 25 \text{ N/cm}^2$, dependiendo de la formulación y las concentraciones específicas utilizadas (Hong et al., 2021). El valor de 17 N/cm^2 alcanzado por la formulación 2A la sitúa en el tercio superior de este rango, confirmando que la estrategia de co-adición de glicerol, PVA,

celulósicos y TiO₂ ha permitido desarrollar una película con una resistencia mecánica competitiva en el sector de los biopolímeros.

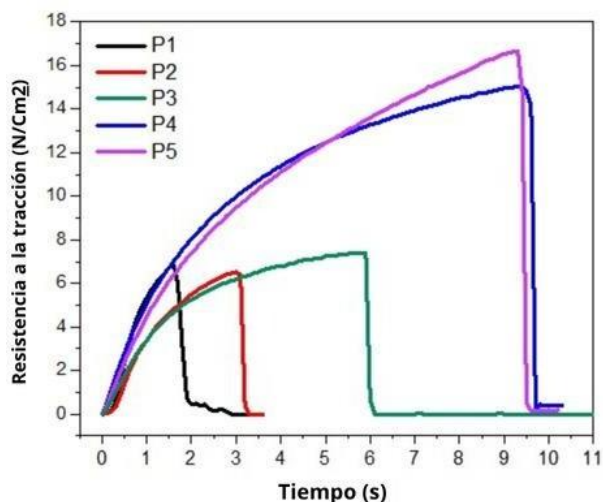


Figura 4. Efecto en la Fuerza tracción en las películas de almidón con diferentes concentraciones de los compuestos.

Retención de agua

En el contexto de almacenamiento, un material polimérico destinado al contacto con productos que puedan liberar líquidos debe poseer no solo una resistencia estructural adecuada, sino también un comportamiento controlado frente a la absorción de fluidos (Albán Bolaños, 2014). Este aspecto es crítico debido a que el almidón, por su naturaleza hidrofílico, presenta una demasiada afinidad por las moléculas de agua, lo que puede comprometer la estabilidad dimensional, la integridad mecánica y la vida útil del material. Una alta absorción de agua podría provocar hinchamiento y pérdida de estabilidad mecánica en las películas, lo que probablemente limite su desempeño en aplicaciones de almacenamiento en ambientes húmedos. Asimismo, la caracterización de la capacidad de absorción de humedad resulta relevante para establecer la viabilidad de estas películas en aplicaciones de envasado (Arruda et al., 2025).

Las películas una vez fueron secadas a temperatura ambiente alcanzaron humedades entre 9.9 y 15.14%. La Tabla 4 muestra los resultados de retención de agua para películas de almidón de yuca modificadas con carboximetilcelulosa, dióxido de titanio, glicerol, metilcelulosa y alcohol polivinílico. Los porcentajes obtenidos varían entre un máximo de 24,8 % (muestra 2E) y un mínimo de 7,52 % (muestra P1), lo que refleja la influencia directa de la composición.

Tabla 4. Resultados retención de agua para películas de almidón yuca.

Película	Masa inicial (g)	Masa final con agua (g)	Absorción de agua (%)
2E	1,2533±0.0002	1,5638	24,8
2A	1,3241±0.0003	1,6288	23,0
PP1	1,4453±0.0003	1,7604	21,8
PC3	1,3134±0.0015	1,4595	11,1
P1	1,1442±0.0010	1,2303	7,52

PP1: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 % y 0,4 g de carboximetilcelulosa.

P1: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %.

PC3: Está compuesta por 4,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 % y 0,06 g de dióxido de titanio.

2E: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,038 g de dióxido de titanio, 0,5 g de carboximetilcelulosa y 0,1 g de metilcelulosa.

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

Películas como 2E y 2A, con mayor incorporación de componentes hidrofílicos o plastificantes, presentaron mayor capacidad de absorción, mientras que formulaciones como PC3 y P1 mostraron una menor afinidad por el agua, posiblemente por la acción de nanopartículas inorgánicas (TiO₂) o matrices más densas y reticuladas (Jeencham et al., 2024). En contraste, aquellas con menor absorción, aunque pueden mostrar menor flexibilidad, tienden a mantener mejores propiedades de barrera y estabilidad dimensional, favoreciendo su uso en empaques biodegradables (Tavares et al., 2020). Estos hallazgos son consistentes con estudios recientes que señalan cómo la incorporación de nanopartículas y rellenos lignocelulósicos reduce la permeabilidad al agua, mientras que un exceso de plastificantes incrementa la interacción con moléculas acuosas (Gomes de Menezes et al., 2021).

La comparación de las propiedades mecánicas y estructurales de la biopelícula optimizada 2A con sistemas amiláceos reportados en la literatura (Tabla 5) valida la eficacia de la estrategia de refuerzo. La formulación final, reforzada con CMC, MC, TiO₂ alcanzó una Resistencia a la Tracción de 17.0 N/m², un valor que la sitúa competitivamente en el rango superior de las biopelículas a base de almidón. Este valor supera significativamente la resistencia de otros biopolímeros basados en almidón de yuca pura o con modificaciones simples, como el almidón de dialdehído (3.06 N/m²) o el almidón de achota (6.45 N/m²). La resistencia de la película optimizada es comparable e incluso superior a sistemas complejos como el almidón de frijol mungo con aceite de girasol y goma guar (13.8-16.3 N/m²) demostrando que la co-adición de PVA y polímeros celulósicos fue eficiente para crear puentes de hidrógeno y una red interpenetrante, reforzando la matriz polimérica. Un resultado intermedio se observó en las películas de yuca funcionalizadas con ZnO, donde la resistencia se incrementó respecto a la yuca dialdehído, indicando que los refuerzos inorgánicos y bioactivos mejoran la integridad de la matriz. Los resultados obtenidos por Polindara, et al 2022, y nuestros resultados resaltan la importancia de la incorporación de nanopartículas y copolímeros para mejorar simultáneamente propiedades mecánicas y de barrera, aspecto clave en el desarrollo de empaques biodegradables(Abe et al., 2021a).

Tabla 5. Comparación propiedades de las películas de almidón con plastificante de glicerol.

Almidón	Copolímero / rellenos	RT (N/m ²)	Retención de agua (%)	Espesor (µm)	Referencia
Jengibre	Bordillo	13.8	5.5	350	(Oluba et al., 2021)
Frijol mungo	Aceite girasol, goma guar	16.35	13.0	92,40	(Lee et al., 2020)
Achota	40% glicerol	6.45	14.9	180	(Abera et al., 2020)
Yuca	Almidón de di aldehído	3.06	6.6	300	(Abe et al., 2021b)
	Piperina y oxido de zinc	10.6	12.8	112	(Polindara Ospina et al., 2022)
Yuca	PVA, glicerol	7.50	21,8	120	
Yuca	CM, CMC, PVA, TiO ₂ , glicerol,	12.50	24,8	120	
Yuca	CM, CMC, PVA, TiO ₂ , glicerol, indicador	17.0	23,0	120	Este estudio

Resistencia a la tracción (RT).

Por otro lado, las películas del presente estudio mostraron porcentajes de absorción de agua relativamente altos (rango 21.8 % a 24.8 %) en comparación con la mayoría de los estudios citados (que oscilan entre 5.5 % y 14.9%). Este elevado contenido de humedad se debe a la alta concentración de glicerol y a la naturaleza hidrofílica del

PVA y la CMC, los cuales actúan como agentes humectantes (Silva da Costa et al., 2023). Si bien un alto contenido de adsorción de agua puede implicar una mayor permeabilidad en ambientes ricos en humedad, esta retención de agua es también el mecanismo que confiere a la película su flexibilidad mejorada, un atributo crucial que contrarresta la fragilidad inherente de los filmes de almidón puro, justificando el balance de la formulación elegida. El espesor uniforme de 120 μm en las muestras finales indica, además, la alta reproducibilidad lograda con la optimización de los componentes.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los resultados de los análisis por infrarrojo con transformada Fourier se pueden observar en la Figura 5. Los espectros de la película 2A evidencia una firma típica de matrices polisacáridicas, caracterizada por una banda ancha atribuida al estiramiento O-H entre 3600 y 3000 cm^{-1} , junto con un conjunto de señales intensas en el rango de 1165 a 980 cm^{-1} , asociadas a enlaces C-O-C del anillo y C-O de grupos alcohol. Estos rasgos confirman que el almidón actúa como fase continua. La ausencia de una señal en torno a 1730 cm^{-1} , propia de grupos carbonilo, indica que, en caso de haber PVA, éste se encuentra en estado de alta hidrólisis (sin restos de acetato), y que no se han incorporado plastificantes tipo éster (Abedi-Firoozjah et al., 2023). La plastificación parece estar dada por glicerol, lo cual se refleja en el refuerzo de las bandas C-O entre 1100 y 1000 cm^{-1} . (Žigon et al., 2025). Por otro lado, la señal cercana a 1640 cm^{-1} corresponde a la deformación angular del agua absorbida ($\delta(\text{H-O-H})$), común en materiales hidrofílicos. Finalmente, las absorciones detectadas entre 680 y 500 cm^{-1} son compatibles con vibraciones Ti-O y Ti-O-Ti del dióxido de titanio, cuya mayor intensidad en espectros de transmisión frente a ATR se explica por la contribución volumétrica en pastillas de KBr. (López et al., 2023).

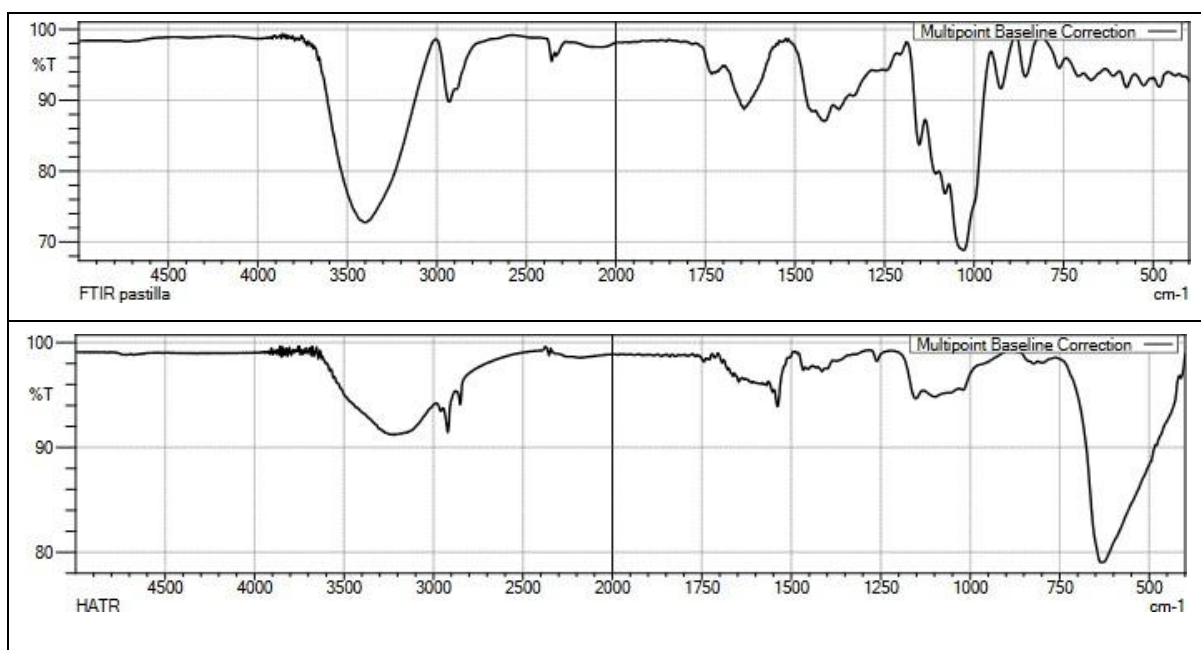


Figura 5. Espectro IR con KBr y HATR de la película 2ª

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa

El análisis por HATR, que se limita a las capas superficiales (con penetración en el orden de micrómetros), se conservan las señales características de los polisacáridos en el intervalo 1165-980 cm^{-1} y el estiramiento O-H entre 3600 y 3000 cm^{-1} , aunque con variaciones leves en la intensidad relativa respecto al modo de transmisión, lo cual es coherente con las propiedades del método ATR y sus ajustes de profundidad (Wu et al., 2017). La ausencia de la banda carbonílica en $\sim 1730 \text{ cm}^{-1}$ refuerza la hipótesis de un PVA altamente hidrolizado o presente en baja proporción. La persistencia o disminución del pico en $\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ aporta información sobre el contenido de agua en la superficie. Si la formulación incluye CMC, el ATR puede amplificar las señales del par COO^- ($\sim 1600/1410 \text{ cm}^{-1}$) cuando hay enriquecimiento superficial del carboxilato; su falta de definición sugiere que la cantidad de CMC es, como máximo, marginal (Kwon et al., 2024). En la región de 700 a 500 cm^{-1} , las bandas

asociadas al TiO_2 tienden a aparecer más atenuadas que en espectros de KBr, lo cual es esperable si el óxido está distribuido en el volumen y no concentrado en la superficie, en concordancia con la sensibilidad superficial del ATR (Bercea, 2024). La Tabla 6 detalla los números de onda y las asignaciones vibracionales correspondientes a las bandas identificadas, revelando los enlaces químicos presentes en las películas analizadas.

Tabla 6. Tabla comparativa de bandas IR

Número de onda (cm^{-1})	Grupo funcional	2A	2E	PP1
3400	O-H (hidroxilos del almidón y agua adsorbida)	Ancha e intensa, más ensanchada en HATR	Similar, menos intensa (mayor orden en matriz)	Similar, pero más estrecha si hay menos humedad
2920 y 2850	C-H (estiramientos CH_2/CH_3)	Se observa banda, más definidas en HATR	Ligeramente menos intensos	Presentes, con menor intensidad
1650-1700	C=O (carbonilos, acetilación o trazas de oxidación)	Débil a moderada, en HATR se resalta	Muy débil o ausente	Débil, casi no visible
1630	H-O-H (agua ligada en la matriz)	Banda clara, más definida en HATR	Presente pero menos marcada	Presente con menor intensidad
1150-1020	C-O-C (puentes glicosídicos, vibraciones almidón)	Bandas intensas, bien definidas en HATR	Presentes, menos intensas	Similares, con ligero desplazamiento
995	C-O (estiramiento primario y secundario)	Intenso	También presente, menor intensidad	Presente, pero desplazado $\pm 5 \text{ cm}^{-1}$
700	Ti-O-Ti (vibración de red TiO_2)	Banda característica	No definida (ausencia de TiO_2)	No definida (ausencia de TiO_2)
500-450	Ti-O (metal-oxígeno, TiO_2)	Pico fuerte	Ausente	Ausente

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

2E: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,038 g de dióxido de titanio, 0,5 g de carboximetilcelulosa y 0,1 g de metilcelulosa.

PP1: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 % y 0,4 g de carboximetilcelulosa.

El análisis comparativo de los espectros FTIR (Tabla 6) revela diferencias significativas en las interacciones moleculares entre las formulaciones 2A, 2E (optimizadas) y la muestra PP1 (no reforzada). La banda ancha y característica en torno a 3400 cm^{-1} , asignada al estiramiento de los grupos O-H (hidroxilos del almidón y agua ligada), fue notablemente más ensanchada e intensa en 2A y 2E, lo que sugiere una mayor formación de puentes de hidrógeno debido a la adición de polímeros celulósicos (CMC/MC) y PVA. Las bandas correspondientes al

esqueleto del polisacárido, específicamente los estiramientos C-O-C (puentes glicosídicos) y C-O (estiramiento primario/secundario) en el rango de 1150 a 995 cm^{-1} se observaron más intensas y definidas en 2A, indicando una mejor organización estructural o una mayor homogeneidad en la matriz reforzada. En contraste, la muestra PP1 mostró una intensidad menor y un ligero desplazamiento 5 cm^{-1} en la banda de 995 cm^{-1} sugiriendo variaciones en el ambiente químico de los grupos hidroxilo debido a una menor interacción de plastificantes. La evidencia más concluyente de la carga se encontró en las muestras 2A y 2E que, a diferencia de PP1, mostraron la banda de vibración de red Ti-O-Ti en 700 cm^{-1} y un pico fuerte en el rango 500 a 450 cm^{-1} (estiramiento Ti-O). La presencia de estas bandas confirma la exitosa incorporación y estabilidad del dióxido de titanio TiO_2 dentro de la matriz polimérica de las formulaciones optimizadas.

Análisis térmicos (TGA y DSC)

Los análisis térmicos mediante termogravimetría (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC) permitió evaluar la estabilidad y comportamiento térmico de la película compuesta a base de almidón de yuca, alcohol polivinílico (PVA), metilcelulosa (MC), carboximetilcelulosa (CMC) y dióxido de titanio (TiO_2) y glicerol. La siguiente figura permite observar los espectros de la caracterización calorimétrica, TGA y DSC, para la película 2A.

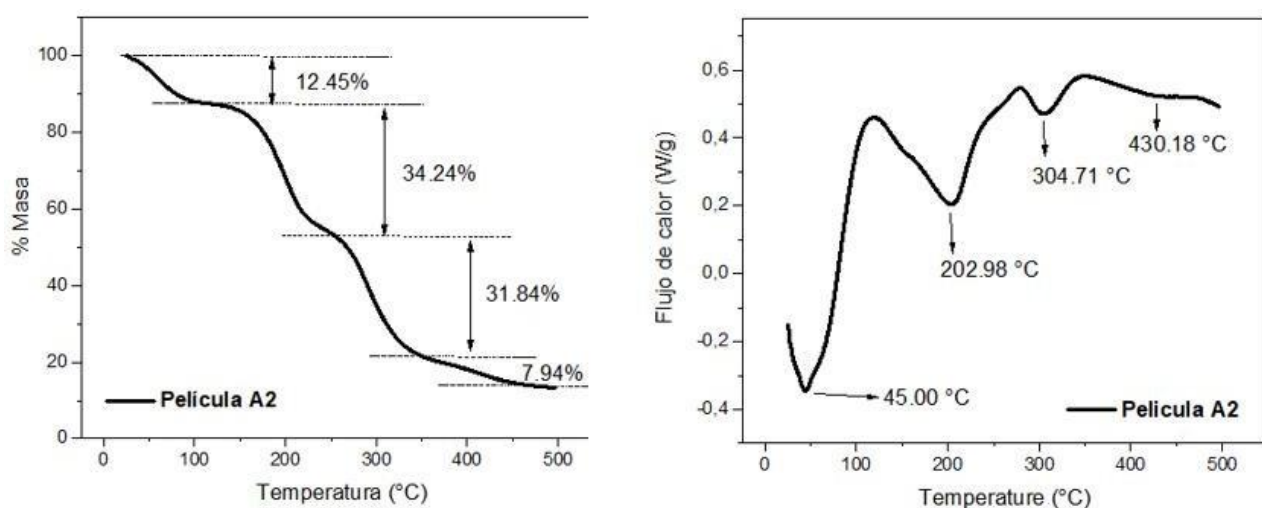


Figura 6. Resultado calorimétrico TGA y DSC de la película 2^a

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

El análisis termogravimétrico (TGA) de la película reveló tres etapas principales de pérdida de masa asociadas a los componentes de la formulación. La primera etapa, observada entre 50 °C y 130 °C, corresponde a la evaporación de agua libre y humedad residual, típica en matrices de almidón plastificadas con compuestos higroscópicos como el glicerol. La segunda etapa, entre 200 °C y 270 °C, refleja la descomposición térmica del plastificante y el inicio de la degradación del almidón, donde se rompen enlaces glucosídicos y se liberan compuestos volátiles (Monroy, 2021). Finalmente, la tercera etapa, por encima de 270 °C hasta 330, se asocia a la degradación de la celulosa y otros componentes orgánicos, aunque sea pronunciada hay una cuarta curva de pérdida de masa entre la temperatura de 400 °C y 500 °C la cual se le atribuye a la descomposición total de los residuos carbonosos, el (TiO_2), por su naturaleza inorgánica y térmicamente estable, su pérdida es nula y permanece como residuo sólido en el rango de la temperatura observada (Barandiarán Torres, 2022). Estos resultados indican que la película posee una estabilidad térmica adecuada hasta aproximadamente 200 °C, lo que la hace viable para aplicaciones que no requieren exposición a temperaturas elevadas (Barandiaran Torres, 2022).

El análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitió identificar varias transiciones térmicas en la película biodegradable. Se observó un pico endotérmico entre 100 °C y 150 °C, atribuible a la transición vítrea del almidón plastificado, correspondiente al punto en el que el material pasa de un estado rígido a uno más flexible (Criollo Guevara et al., 2024). El comportamiento anterior es característico de sistemas poliméricos amorfos

modificados con plastificantes como el glicerol, que aumentan la movilidad de las cadenas. Un segundo evento endotérmico, entre 200 °C y 250 °C, podría estar relacionado con la fusión parcial de regiones cristalinas o con la descomposición de componentes volátiles (Ramos Montes et al., 2023). En conjunto, el perfil térmico obtenido por DSC respalda la flexibilidad y estabilidad de la película en condiciones moderadas de temperatura, reforzando su potencial para aplicaciones funcionales en empaques biodegradables (Ramos Montes et al., 2023).

En la Tabla 7 se puede observar las temperaturas y el porcentaje de pérdida de masa y de la entalpía del proceso, obtenida desde los espectros del flujo de calor (DSC) para las películas PA5, 2E y 2A. La película PA5 exhibió la primera pérdida de masa a temperatura de inicio más alta 53.92 °C, lo cual, junto con la menor pérdida de masa para 2A (9.9 %), sugiere que la película 2A (la más reforzada) presenta una mayor interacción entre la matriz polimérica y los aditivos, lo que resulta en una mejor retención de humedad y, por lo tanto, una mayor estabilidad inicial del sistema. La menor entalpía (3.80 J/g) en 2A respalda una matriz más densa y con menor agua libre. La comparación de la tendencia de descomposición de las cadenas laterales del PVA y la degradación incipiente del almidón establece que la película 2A mostró la temperatura de inicio más alta (203.0 °C), indicando que la incorporación de CMC/MC y TiO₂ mejoró la estabilidad térmica del almidón. La muestra 2E, que alcanzó 36.26% de pérdida de masa en esta etapa, sugiere una degradación más pronunciada de sus componentes menos estables a esta temperatura. Finalmente, la descomposición de las cadenas poliméricas principales (almidón y celulósicos) establece que la película 2E mostró la mayor resistencia térmica con un pico a 322.2 °C, lo que podría atribuirse a la diferente proporción de refuerzo celulósico frente a 2A (304.7 °C). El hecho de que 2A presente una etapa de descomposición final residual a 430.18 °C (correspondiente a la degradación de residuos carbonosos), mientras que las otras no la reportan, sugiere una mayor eficiencia del TiO₂ en la estabilización y la formación de residuos térmicamente estables en la película optimizada.

Tabla 7. Resultados calorimétricos de películas de almidón mejorada y sin mejorar.

Proceso	Temperatura, Pérdida masa, Entalpía		
	PA5	2E	2A
Vaporización agua y glicerol	53.92°C, 12.87%, 6.50 J/g	45.0°C, 15.14%, 5.25 J/g	45.0°C, 9.9%, 3.80 J/g
Descomposición almidón y/o cadenas laterales de PVA	195.5°C; 33.21%, 23.8 J/g	189.6°C, 36.26%, 22.5 J/g	203.0°C, 29.5%, 24.1 J/g
Descomposición cadenas poliméricas principales	309.0°C, 34.93%, 53.0 J/g	322.2°C, 32.56%, 54.5 J/g	304.7°C, 46.3%, 50.2 J/g
Descomposición de total de residuos carbonosos	N/A	N/A	430.18 °C, 7.92%, 55.60 J/g

PA5: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 13 %, 0,05 g de dióxido de titanio, 0,5 g de carboximetilcelulosa y 0,1 g de metilcelulosa

2E: Está compuesta por 2,0 g de almidón, 2,0 g de plastificante glicerol, 18,0 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,038 g de dióxido de titanio, 0,5 g de carboximetilcelulosa y 0,1 g de metilcelulosa.

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

En la literatura no se encuentran valores establecidos de una entalpía asociada a la transición vítrea (ΔH_{tg}) de sistemas formados por almidón, glicerol y alcohol polivinílico (PVA). Esto se debe a que depende de manera significativa de la composición química, el grado de miscibilidad entre los componentes. Por esta razón, los estudios sobre este tipo de biopolímeros se enfocan principalmente en la temperatura de transición vítrea (T_g) y en otros procesos termoanalíticos, como la fusión cristalina (ΔH_m) o la gelatinización, los cuales presentan señales más claras en los termogramas obtenidos por DSC (Zhou et al., 2009). Diferentes investigadores han informado que las mezclas de almidón y PVA plastificadas con glicerol pueden mostrar una o dos transiciones vítreas, dependiendo de la compatibilidad entre las fases poliméricas. La presencia de dos (T_g) de una única transición

amplia indica una miscibilidad parcial, fenómeno común en sistemas con interacción incompleta entre los componentes (Pandit Potdar et al., 2023).

En cuanto a la entalpía de fusión, se ha observado que su valor varía de acuerdo con las condiciones de procesamiento. Por ejemplo, películas de almidón/PVA sin tratamiento térmico presentan una ΔH_m cercana a 0.060 J/g, mientras que muestras sometidas a procesos de recocido térmico alcanzan valores del orden de 6.74 J/g, lo cual es un valor comparable con lo obtenido en este estudio. Este dato evidencia una mayor cristalinidad y una reorganización molecular más ordenada, confirmando que la magnitud de la entalpía depende del tratamiento térmico a que se someta la película (Pandit Potdar et al., 2023).

El glicerol, utilizado comúnmente como plastificante, también influye notablemente en las propiedades térmicas del sistema. Se ha reportado que el aumento de su concentración puede modificar la T_g de aproximadamente 37.5°C a 38.6 °C, y elevar la entalpía de fusión (ΔH_m) desde 100.4 J/g hasta 155 J/g. Este incremento refleja la mayor movilidad de las cadenas poliméricas y la mejora en la compatibilidad entre el almidón y el PVA, lo cual favorece una distribución más homogénea de las fases (Franco et al., 2021). Estos son valores mayores pero comparable con los arrojados por el DSC de las películas desarrolladas que tienen valores desde 20 J/g hasta 55J/g, lo cual se puede atribuir a matrices y concentraciones diferentes, lo cual no lo hace comparable directamente, pero sí sirve como valores de referencia (Hernández Alba t, 2020)

Efecto de la adición de indicador de pH en las películas

La Figura 6 presenta la evidencia del funcionamiento de la película 2A como empaque inteligente, mostrando el cambio cromático resultante de la acción del indicador natural de pH (antocianinas).

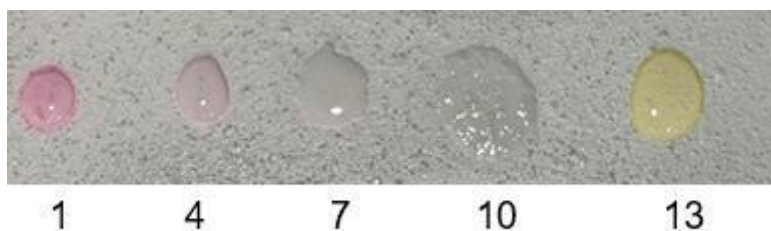


Figura 7. Película 2A, la cual se le adicionó indicador de pH natural (antocianina).

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

El desempeño de la película optimizada como sensor activo fue validado mediante la exposición a soluciones tampón con valores de pH discretos, abarcando un amplio espectro desde el ácido extremo hasta el básico (pH 1, 4, 7, 10 y 13). La formulación que incorporó el indicador mixto de antocianinas manifestó variaciones cromáticas a lo largo de este rango. Estos resultados confirman la sensibilidad del pigmento natural ante las fluctuaciones de la concentración de iones de hidronio, demostrando así el potencial de la biopelícula para funcionar como un sensor visual eficiente de los cambios de acidez o basicidad en el entorno de envasado.

En condiciones muy ácidas (pH 1) apareció un tono rojo intenso, característico de la forma catiónica de flavylum, que se mantiene estable en ambientes fuertemente ácidos. A pH 4 el color cambió hacia un matiz violeta, lo cual refleja la presencia simultánea de la forma flavylum y su base quinoidal, equilibradas según la cantidad de protones presentes (Cruz et al., 2021). En valores próximos a la neutralidad (pH 7), el color se volvió muy tenue o prácticamente incoloro, resultado de la transformación del catión flavylum hacia estructuras hemicetálicas y pseudobases sin color, menos estables y con menor capacidad de absorber luz visible. Este comportamiento es típico en las antocianinas y explica la disminución en la intensidad del color alrededor de pH neutro (Chua et al., 2024).

Cuando el medio es básico intenso (pH 10 y 13), se observaron tonalidades que iban del amarillo al verde, relacionadas con la desprotonación de la base quinoidal y la apertura del anillo que da lugar a chalconas. Estas

nuevas formas presentan una conjugación electrónica distinta, lo que desplaza la absorción hacia otras longitudes de onda y genera los colores característicos. Finalmente, en la muestra con indicador mixto predominó un verde intenso, lo que concuerda con un medio básico fuerte y con la presencia mayoritaria de chalconas y derivados aniónicos de las antocianinas (Gençdağ et al., 2022). La figura 8 muestra la reacción de la antocianina en medio ácido y básico.

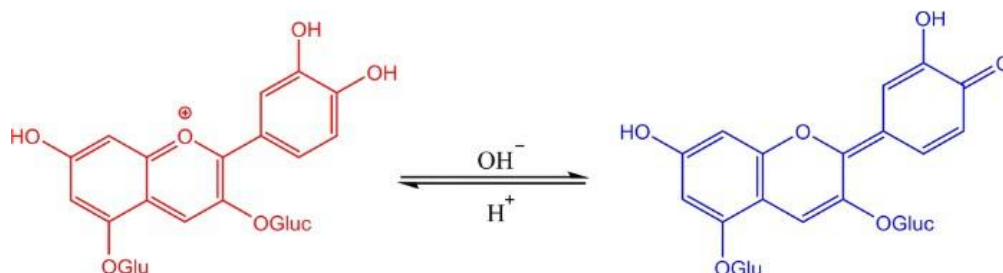


Figura 8. Estructuras de las antocianinas a pH ácido y básico (Garzón, n.d.).

En contraste con el desempeño de las antocianinas, la evaluación de la película con el indicador de pH extraído de cúrcuma (*curcumina*) mostró una sensibilidad cromática limitada. Tal como se evidencia en la Figura 9, las variaciones de color fueron mínimas o imperceptibles en el rango ácido y neutro, con cambios notables restringidos exclusivamente al extremo alcalino (pH 10). Este resultado sugiere una ventana de detección de pH mucho más estrecha para la curcumina en la matriz de la biopelícula, en comparación con el indicador de antocianinas.

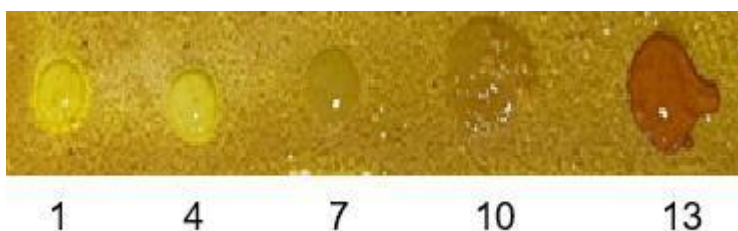


Figura 9. Prueba de pH en la película 2A con indicador de cúrcuma.

2A: Está compuesta por 2,5 g de almidón, 2,5 g de plastificante glicerol, 22,5 g de alcohol polivinílico al 10 %, 0,06 g de dióxido de titanio, 0,625 g de carboximetilcelulosa y 0,125 g de metilcelulosa.

La prueba realizada con soluciones tampón en diferentes valores de pH (1, 4, 7, 10 y 13), utilizando extracto de cúrcuma como indicador natural, mostró un comportamiento particular frente a los cambios en la acidez y la basicidad. En los tampones correspondientes a pH 1, 4 y 7 se observó que el color predominante fue amarillo, lo que refleja la estabilidad del pigmento principal de la cúrcuma, la curcumina, en presencia de protones y en ambientes que no son fuertemente básicos. Este resultado indica que, en condiciones ácidas y cercanas a la neutralidad, la estructura de la curcumina se mantiene sin modificaciones relevantes y conserva su patrón de absorción característico (Etxabide et al., 2021).

El viraje más notorio se presentó en los tampones básicos (pH 10 y 13), donde el color cambió hacia tonos marrón-rojizos. Este fenómeno está relacionado con la desprotonación de los grupos fenólicos de la curcumina, lo que modifica la conjugación electrónica de la molécula y genera un nuevo perfil de absorción en la región visible (Mali et al., 2024). Dicho comportamiento coincide con lo descrito en estudios previos, que señalan a la cúrcuma como un indicador sensible en medios alcalinos, mostrando un cambio evidente de amarillo a rojizo conforme aumenta la concentración de iones hidroxilo como se puede observar en la figura 10. En el caso del indicador mixto se obtuvo un tono verde, resultado de la coexistencia de distintas formas moleculares de la curcumina en un medio altamente básico. Este hallazgo confirma que, aunque en condiciones ácidas y neutras la cúrcuma mantiene un

color estable, en presencia de alcalinidad muestra un viraje cromático claro y reproducible, lo que respalda su utilidad como indicador natural en ensayos cualitativos (Ndwandwe et al., 2024).

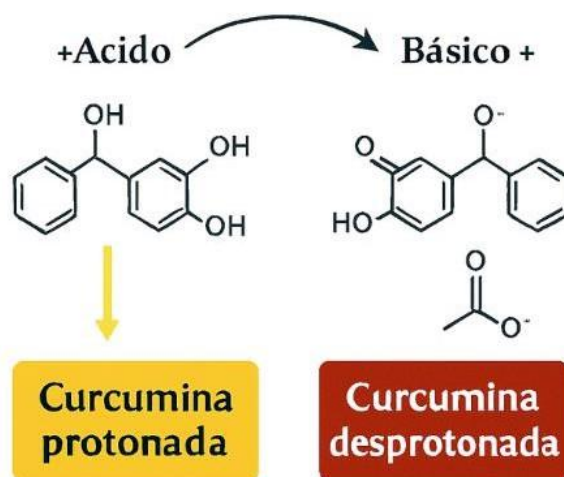


Figura 10. Estructura molecular de la curcumina con los grupos funcionales. La curcumina contiene un sistema β-dicetona central con un grupo enólico (-OH) y dos grupos hidroxilo fenólicos (-OH) en los extremos aromáticos.

3. CONCLUSIONES

Las películas biodegradables desarrolladas a partir de almidón de yuca, modificadas con dióxido de titanio y reforzadas con polímeros como alcohol polivinílico, metilcelulosa y carboximetilcelulosa, mostraron mejoras sustanciales en sus propiedades mecánicas, térmicas y funcionales, demostrando su potencial como materiales alternativos en aplicaciones de empaque. La inclusión de dióxido de titanio en la matriz polimérica favoreció la resistencia estructural y la estabilidad térmica de las películas, como lo demuestran los análisis de tracción y los estudios termoanalíticos, indicando una interacción efectiva entre los componentes orgánicos e inorgánicos. Los espectros obtenidos mediante técnicas de infrarrojo (FTIR) confirmaron la presencia de los aditivos funcionales y su adecuada integración en la matriz, lo que contribuye a la homogeneidad del material y a su desempeño fisicoquímico.

Las películas funcionalizadas con pigmentos naturales como antocianinas y curcumina respondieron de manera visible a variaciones en el pH, lo que, valida su uso como sensores inteligentes en sistemas de envasado activo, capaces de indicar condiciones de deterioro o contaminación. La capacidad de absorción de humedad de las películas estuvo influenciada por la composición polimérica, siendo el glicerol y la carboximetilcelulosa los principales responsables de la retención hídrica, lo que debe considerarse en aplicaciones donde la interacción con líquidos sea relevante. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el desarrollo de biopelículas con propiedades mejoradas y funcionalidades avanzadas, posicionándolas como una alternativa viable y sostenible frente a los plásticos convencionales, especialmente en el contexto de la industria alimentaria y la gestión ambiental.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el desarrollo de biopelículas con propiedades mejoradas y funcionalidades avanzadas, posicionándolas como una alternativa viable y sostenible frente a los plásticos convencionales, especialmente en el contexto de la industria alimentaria y la gestión ambiental.

4. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Santiago de Cali, por brindarnos la oportunidad de adquirir conocimientos y habilidades que han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Al Laboratorio de Ciencias Básicas y al Laboratorio de Fisicoquímica, por facilitar los análisis de DSC/TGA y FTIR. Al Químico Gustavo Polindara Ospina, por su valiosa colaboración en la realización de las pruebas de resistencia a la tracción y por compartir su conocimiento. A la MSc Sandra Patricia Castro Narváez, por su disposición, orientación y conocimientos fundamentales que contribuyeron significativamente en la culminación de este estudio.

5. REFERENCIAS

- Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021a). Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 2484, 13(15), 2484. doi: 10.3390/POLYM13152484
- Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021b). Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers*, 13(15), 2484. doi: 10.3390/POLYM13152484
- Abedi-Firoozjah, R., Chabook, N., Rostami, O., Heydari, M., Kolahtouz-Nasiri, A., Javanmardi, F., Abdolmaleki, K., & Mousavi Khaneghah, A. (2023). PVA/starch films: An updated review of their preparation, characterization, and diverse applications in the food industry. *Polymer Testing*, 118, 107903. doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2022.107903
- Abera, G., Woldeyes, B., Demash, H. D., & Miyake, G. (2020). The effect of plasticizers on thermoplastic starch films developed from the indigenous Ethiopian tuber crop Anchote (*Coccinia abyssinica*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 581-587. doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2020.03.218
- Agustin, Y. E., & Padmawijaya, K. S. (2017). Effect of glycerol and zinc oxide addition on antibacterial activity of biodegradable bioplastics from chitosan-kepok banana peel starch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 223(1). doi: 10.1088/1757-899X/223/1/012046
- Ahmed, S., & Ali, M. (2023a). Potential Applications of Different Forms of Recycled Plastics as Construction Materials—A Review. *Engineering Proceedings 2023*, Vol. 53, Page 5, 53(1), 5. doi: 10.3390/IOCBD2023-15177
- Ahmed, S., & Ali, M. (2023b). Potential Applications of Different Forms of Recycled Plastics as Construction Materials—A Review. *Engineering Proceedings 2023*, Vol. 53, Page 5, 53(1), 5. doi: 10.3390/IOCBD2023-15177
- Albán Bolaños, P. (2014). *Efecto del ácido cítrico en las propiedades de tensión y propiedades de barrera en películas elaboradas a base de almidón termoplástico de yuca*. Retrieved from <https://repositorio.minciencias.gov.co/handle/20.500.14143/21770>
- Arruda, T. R., Machado, G. de O., Marques, C. S., Souza, A. L. de, Pelissari, F. M., Oliveira, T. V. de, & Silva, R. R. A. (2025). An Overview of Starch-Based Materials for Sustainable Food Packaging: Recent Advances, Limitations, and Perspectives. *Macromol* 2025, Vol. 5, Page 19, 5(2), 19. doi: 10.3390/MACROMOL5020019
- Ballesteros-Mártinez, L., Pérez-Cervera, C., & Andrade-Pizarro, R. (2020). Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS Journal*, 20, 1-9. doi: 10.1016/J.NFS.2020.06.002
- Barandiaran Torres, A. (2022). *Desarrollo del proceso de extracción del almidón de residuos de patata y caracterización del mismo con el fin de validar su utilización para la elaboración*

- de películas de bioplástico. Universitat Politècnica de València. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/188964>
- Bercea, M. (2024). Recent Advances in Poly(vinyl alcohol)-Based Hydrogels. *Polymers*, 16(14), 2021. doi: 10.3390/POLYM16142021
- Cardona, A. (2019). *Aumenta el consumo de la yuca industrial en Colombia con mejoras en variedades*. Agronegocios.co. Retrieved from <https://www.agronegocios.co/agricultura/aumenta-el-consumo-de-la-yuca-industrial-en-colombia-con-mejoras-en-variedades-2820472>
- Cedeño Sares, L. A., Armijos Cabrera, G., Arias Toro, D., & Bravo Bravo, V. P. (2023). Efecto del glicerol como plastificante en películas de almidón de maíz modificado. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, ISSN 2528-8083, Vol. 8, N^o. 4, 2023, Págs. 186-204, 8(4), 186-204. doi: 10.5281/zenodo.10045595
- Chua, L. S., Thong, H. Y., & Soo, J. (2024). Effect of pH on the extraction and stability of anthocyanins from jaboticaba berries. *Food Chemistry Advances*, 5, 100835. doi: 10.1016/J.FOCHA.2024.100835
- Criollo Guevara, H. T., & Ocoró Caicedo, L. V. (2024). *Obtención y caracterización de película a partir de almidón reforzado con nanoarcillas*. Retrieved from <https://repositorio.usc.edu.co/handle/20.500.12421/6935>
- Cruz, L., Basílio, N., Mateus, N., De Freitas, V., & Pina, F. (2021). *Natural and Synthetic Flavylum-Based Dyes: The Chemistry Behind the Color*. doi: 10.1021/acs.chemrev.1c00399
- ENRÍQUEZ C, M., VELASCO M, R., & ORTIZ G, V. (2012). PELÍCULAS BIODEGRADABLES BASADAS EN ALMIDÓN. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 182-192. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Etxabide, A., Kilmartin, P. A., & Maté, J. I. (2021). Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*, 121, 107645. doi: 10.1016/J.FOODCONT.2020.107645
- Fortich, L. B., & Diaz Barros, A. (2017). *LA ANTOCIANINA COMO SUSTITUTO DE LOS INDICADORES DE pH SINTÉTICOS: UN PASO HACIA LOS PRODUCTOS VERDES*.
- Frączak, D., & Frączak, D. (2021). Chemical Recycling of Polyolefins (PE, PP): Modern Technologies and Products. *Waste Material Recycling in the Circular Economy - Challenges and Developments*. doi: 10.5772/INTECHOPEN.99084
- Franco, E., Dussán, R., Navia, D. P., & Amú, M. (2021). Study of the Annealing Effect of Starch/Polyvinyl Alcohol Films Crosslinked with Glutaraldehyde. *Gels*, 7(4), 249. doi: 10.3390/GELS7040249
- Garces Vargas, A. J., & Hernández Alba, Y. T. (2020). *Evaluación de películas poliméricas basadas en almidón de maíz, ácido poliláctico y polivinil alcohol como alternativa para la sustitución de polímeros convencionales a nivel laboratorio*. Fundación Universidad de América. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7790>
- García Salcedo, I. N. (2025). *Elaboración y caracterización de una película biodegradable proveniente del mucílago de nopal, almidón de papa, glicerol y ácido acético para la sustitución de plásticos convencionales*. Fundación Universidad de América. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9823>

- Garzón, G. A. (n.d.). *LAS ANTOCIANINAS COMO COLORANTES NATURALES Y COMPUESTOS BIOACTIVOS: REVISIÓN Anthocyanins as Natural Colorants and Bioactive Compounds. A Review.*
- Gençdağ, E., Özdemir, E. E., Demirci, K., Görgüç, A., & Yılmaz, F. M. (2022). Copigmentation and stabilization of anthocyanins using organic molecules and encapsulation techniques. *Current Plant Biology*, 29, 100238. doi: 10.1016/J.CPB.2022.100238
- Gomes de Menezes, F. L., de Lima Leite, R. H., Gomes dos Santos, F. K., Aria, A. I., & Aroucha, E. M. M. (2021). TiO₂-enhanced chitosan/cassava starch biofilms for sustainable food packaging. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127661. doi: 10.1016/J.COLSURFA.2021.127661
- Gusain, R., Gupta, K., Joshi, P., & Khatri, O. P. (2019). Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 272, 102009. doi: 10.1016/J.CIS.2019.102009
- Halonen, N., Pálvölgyi, P. S., Bassani, A., Fiorentini, C., Nair, R., Spigno, G., & Kordas, K. (2020). Bio-Based Smart Materials for Food Packaging and Sensors – A Review. *Frontiers in Materials*, 7, 521914. doi: 10.3389/FMATS.2020.00082/BIBTEX
- Hernandez Alba t. (2020, January). *EVALUACIÓN DE PELÍCULAS POLIMÉRICAS BASADAS EN ALMIDON DE MAÍZ, ÁCIDO POLILÁCTICO Y POLIVINIL ALCOHOL COMO ALTERNATIVA PARA LA SUSTITUCIÓN DE POLIMEROS CONVENCIONALES A NIVEL LABORATORIO.* Retrieved from <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/45662f35-77d6-4407-8cab-0c38e20a4dbe/content>
- Hernández Morales, E. A. (2023). *Desarrollo y caracterización de placas bioplásticas de almidón-celulosa.* Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12371/27564>
- Hernando, O., Cuervo, P., Reinaldo, ;, & Mosquera, V. (n.d.). *Propiedades físicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha Physicochemical and mechanical properties of film obtained from native and oxidized arracacha starch.*
- Hoek, Z., du Toit, E. L., Niemand, D., Wesley-Smith, J., & Focke, W. W. (2024). Dried nanocellulose/xanthan as reinforcing fillers in thermoplastic starch. *Cellulose* 2024 31:11, 31(11), 6733-6746. doi: 10.1007/S10570-024-06006-4
- Hong, T., Yin, J. Y., Nie, S. P., & Xie, M. Y. (2021). Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective. *Food Chemistry: X*, 12. doi: 10.1016/j.fochx.2021.100168
- Iacovone, C., Yulita, F., Cerini, D., Peña, D., Candal, R., Goyanes, S., Pietrasanta, L. I., Guz, L., & Famá, L. (2023). Effect of TiO₂ Nanoparticles and Extrusion Process on the Physicochemical Properties of Biodegradable and Active Cassava Starch Nanocomposites. *Polymers*, 15(3). doi: 10.3390/POLYM15030535
- Jeencham, R., Chiaoketwit, N., Numpaisal, P. O., & Ruksakulpiwat, Y. (2024). Study of Biocomposite Films Based on Cassava Starch and Microcrystalline Cellulose Derived from Cassava Pulp for Potential Medical Packaging Applications. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 4242, 14(10), 4242. doi: 10.3390/APP14104242
- Kwon, H. J., Hong, S. M., Park, S. M., & Lee, C. W. (2024). Characterization of acid-modified polyvinyl alcohol and its application to barrier-coated paper for eco-friendly food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 43, 101271. doi: 10.1016/J.FPSL.2024.101271

- Lee, J. S., Lee, E. sil, & Han, J. (2020). Enhancement of the water-resistance properties of an edible film prepared from mung bean starch via the incorporation of sunflower seed oil. *Scientific Reports*, 10(1), 1-15. doi: 10.1038/S41598-020-70651-5;SUBJMETA
- Lomelí-Ramírez, M. M. ;, Robledo-Ortiz, M. G. ;, Silva-Guzmán, J. R. ;, Diglycidyl, G., González-Pérez, M. M., Lomelí-Ramírez, M. G., Robledo-Ortiz, J. R., Silva-Guzmán, J. A., & Manríquez-González, R. (2024). Biodegradable Biocomposite of Starch Films Cross-Linked with Polyethylene Glycol Diglycidyl Ether and Reinforced by Microfibrillated Cellulose. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 1290, 16(9), 1290. doi: 10.3390/POLYM16091290
- López, A. R. C., Castillo, H. S. V., Trochez, J. J. P., Buitrago, C. E. M., & López, R. A. G. (2023). Mechanical properties of films obtained from thermoplastic starch pellets stored under different conditions. *Acta Agronomica*, 72(3). doi: 10.15446/acag.v72n3.108129
- Mali, S. N., & Pandey, A. (2024). Development of curcumin integrated smart pH indicator, antibacterial, and antioxidant waste derived Artocarpus lakoocha starch-based packaging film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275, 133827. doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133827
- Mari, R. P., Sornas, J. J., & Bierhalz, A. C. K. (2023). Polysaccharide-based films reinforced with nanocellulose isolated from raw and bleached cotton. *Cellulose*, 30(3), 1657-1668. doi: 10.1007/S10570-022-04980-1/METRICS
- Martínez, H. M., & López-Zamora, L. (2018). *Modificación química de nanopartículas de dióxido de titanio para mejorar las propiedades de las películas de quitosano-almidón*. Retrieved from <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/311>
- Meng, L., Ding, P., Tan, Y., Zhang, Y., & Zhao, J. (2025). Study on the Ultrasonic-Assisted Extraction Process of Anthocyanin from Purple Cabbage with Deep Eutectic Solvent. *Molecules*, 30(6), 1281. doi: 10.3390/MOLECULES30061281/S1
- Monroy, Y. (2021). *Desarrollo de bioadhesivos a base de almidones modificados con aplicaciones potenciales en el área de envases*. doi: 10.35537/10915/130823
- Mori, R. (2023). Replacing all petroleum-based chemical products with natural biomass-based chemical products: a tutorial review. *RSC Sustainability*, 1(2), 179-212. doi: 10.1039/d2su00014h
- Nagaoka, I., Tsuruta, A., & Yoshimura, M. (2019). Chondroprotective action of glucosamine, a chitosan monomer, on the joint health of athletes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 795-800. doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2019.03.234
- Ndwandwe, B. K., Malinga, S. P., Kayitesi, E., & Dlamini, B. C. (2024). Recent developments in the application of natural pigments as pH-sensitive food freshness indicators in biopolymer-based smart packaging: challenges and opportunities. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 2148-2161. doi: 10.1111/IJFS.16990
- NTC 942 | PDF | Rendimiento (ingeniería) | Estrés (Mecánica). (n.d.). Retrieved from <https://es.scribd.com/document/187461074/ntc-942>
- NTC870 | PDF | Medición | Naturaleza. (n.d.). Retrieved from <https://es.scribd.com/document/405062348/NTC870>
- Oluba, O. M., Obi, C. F., Akpor, O. B., Ojeaburu, S. I., Ogunrotimi, F. D., Adediran, A. A., & Oki, M. (2021). Fabrication and characterization of keratin starch biocomposite film from chicken feather waste and ginger starch. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11. doi: 10.1038/S41598-021-88002-3;SUBJMETA
- Pandit Potdar, P., Kaur, P., Singh, M., Kulkarni, M. B., & Radhakrishnan, S. (2023). STRUCTURE DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF PLASTICIZED PVA-STARCH-

PADDY STRAW COMPOSITES. *CELLULOSE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*
Cellulose Chem. Technol, 57(9), 1073-1085.

- Phothisarattana, D., Wongphan, P., Promhuad, K., Promsorn, J., & Harnkarnsujarit, N. (2021). Biodegradable Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Thermoplastic Starch-Blended TiO₂ Nanocomposite Blown Films as Functional Active Packaging of Fresh Fruit. *Polymers*, 13(23). doi: 10.3390/POLYM13234192
- Polindara Ospina, G. A., & Franco Araujo, R. F. (2022). *Estudios mecánicos y microbiológicos de películas de almidón de yuca funcionalizadas con óxido de zinc y piperina*. Retrieved from <https://repositorio.usc.edu.co/handle/20.500.12421/6840>
- Pormsila, W., & Udomphoch, P. (2025). Biodegradable Film of Starch-Based Carboxymethyl Cellulose from Rice Husk and Straw for Application in Food Preservation. *Processes* 2025, Vol. 13, Page 1387, 13(5), 1387. doi: 10.3390/PR13051387
- Poudel, R., Dutta, N., & Karak, N. (2023). A mechanically robust biodegradable bioplastic of citric acid modified plasticized yam starch with anthocyanin as a fish spoilage auto-detecting smart film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 125020. doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2023.125020
- Qin, S., Sun, H., Wan, X., Wu, Y., Lin, X., Kan, H., Hou, D., Zheng, Z., He, X., & Liu, C. (2023). Carboxymethylcellulose reinforced starch films and rapid detection of spoiled beverages. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. doi: 10.3389/FBIOE.2022.1099118
- Ramos Montes, J. L., & Rivero Pineda, L. F. (2023). *DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES A PARTIR DE ALMIDÓN NATIVO Y OXIDADO DE BATATA CON CARBONATO DE CALCIO COMO MATERIAL DE RELLENO*. Retrieved from <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/12084>
- Reyes Mendoza, R. (2024). *Caracterización de una biopelícula elaborada con carboximetilcelulosa, harina de cáscara y almidón de Oxalis tuberosa y maíz (Zea mays)*. Retrieved from <http://200.57.56.70:8080/xmlui/handle/231104/4875>
- Saidi, L., Zia, M. Bin, Gullins, A., Wang, Y., Wich, P. R., & Selomulya, C. (2025). Enhancing the Water Resistance of Carboxymethyl Cellulose Films with Cellulose Nanofibers from Spent Coffee Grounds and Grapeseed Oil. *Food and Bioprocess Technology* 2025, 1-18. doi: 10.1007/S11947-025-04068-1
- Schreuders, F. K. G., Sagis, L. M. C., Bodnár, I., Erni, P., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2021). Mapping the texture of plant protein blends for meat analogues. *Food Hydrocolloids*, 118, 106753. doi: 10.1016/J.FOODHYD.2021.106753
- Shanbhag, C., Shenoy, R., Shetty, P., Srinivasulu, M., & Nayak, R. (2023). Formulation and characterization of starch-based novel biodegradable edible films for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 60(11), 2858-2867. doi: 10.1007/S13197-023-05803-2/TABLES/4
- Silva da Costa, D., Ribeiro Costa, R. M., Takeuchi, K. P., & Lopes, A. S. (2023). Technological parameters of cassava starch/carboxymethyl cellulose blend-based films added of soy lecithin and tocopherol mix. *Polymer Testing*, 129, 108245. doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2023.108245
- Šimkovic, I., Guemann, F., Hricovíni, M., Mendichi, R., Schieron, A. G., Piovani, D., Zappia, S., Dobročka, E., Filip, J., & Hricovíni, M. (2023). Properties of quaternized and crosslinked carboxymethylcellulose films. *Cellulose*, 30(4), 2023-2036. doi: 10.1007/S10570-022-05031-5/METRICS

- Slaček, G., Kotnik, P., Osmić, A., Postružnik, V., Knez, Ž., Finšgar, M., & Knez Marevci, M. (2023). The Extraction Process, Separation, and Identification of Curcuminoids from Turmeric *Curcuma longa*. *Foods*, 12(21), 4000. doi: 10.3390/FOODS12214000
- Sun, Z., Tang, Z., Li, X., Li, X., Morrell, J. J., Beaugrand, J., Yao, Y., & Zheng, Q. (2022). The Improved Properties of Carboxymethyl Bacterial Cellulose Films with Thickening and Plasticizing. *Polymers*, 14(16). doi: 10.3390/POLYM14163286
- Tavares, K. M., Campos, A. de, Luchesi, B. R., Resende, A. A., Oliveira, J. E. de, & Marconcini, J. M. (2020). Effect of carboxymethyl cellulose concentration on mechanical and water vapor barrier properties of corn starch films. *Carbohydrate Polymers*, 246, 116521. doi: 10.1016/J.CARBPOL.2020.116521
- Tian, X., Chen, Z., Lu, X., Mu, J., Ma, Q., & Li, X. (2023). Soy Protein/Polyvinyl-Alcohol (PVA)-Based Packaging Films Reinforced by Nano-TiO₂. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 1764, 15(7), 1764. doi: 10.3390/POLYM15071764
- Verde, C. (2023). *Cultivos de yuca industrial en Colombia - Colombia Verde*. Retrieved from <https://colombiaverde.com.co/geografia/agricultura/cultivos-de-yuca-industrial-en-colombia/>
- Vicente Vanegas-Useche, L. (2004). *MATERIALES COMPUESTOS INTELIGENTES*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/44131244>
- Wu, Z., Wu, J., Peng, T., Li, Y., Lin, D., Xing, B., Li, C., Yang, Y., Yang, L., Zhang, L., Ma, R., Wu, W., Lv, X., Dai, J., & Han, G. (2017). Preparation and Application of Starch/Polyvinyl Alcohol/Citric Acid Ternary Blend Antimicrobial Functional Food Packaging Films. *Polymers*, 9(3), 102. doi: 10.3390/POLYM9030102
- Zhou, X. Y., Cui, Y. F., Jia, D. M., & Xie, D. (2009). Effect of a Complex Plasticizer on the Structure and Properties of the Thermoplastic PVA/Starch Blends. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(5), 489-495. doi: 10.1080/03602550902824275
- Žigon, J., Poljanšek, I., Oven, P., Petrič, M., & Osolnik, U. (2025). Application and characterization of poly(vinyl alcohol) reinforced with cellulose nanofibrils as a coating for wood. *Cellulose*, 32(10), 6229-6252. doi: 10.1007/s10570-025-06606-8
- Zupanc, A., Petkovšek, M., Zdovc, B., Žagar, E., & Zupanc, M. (2024). Degradation of hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 109. doi: 10.1016/j.ultsonch.2024.107020

ANEXO 1: INFORMACION ADICIONAL DEL FORMATO

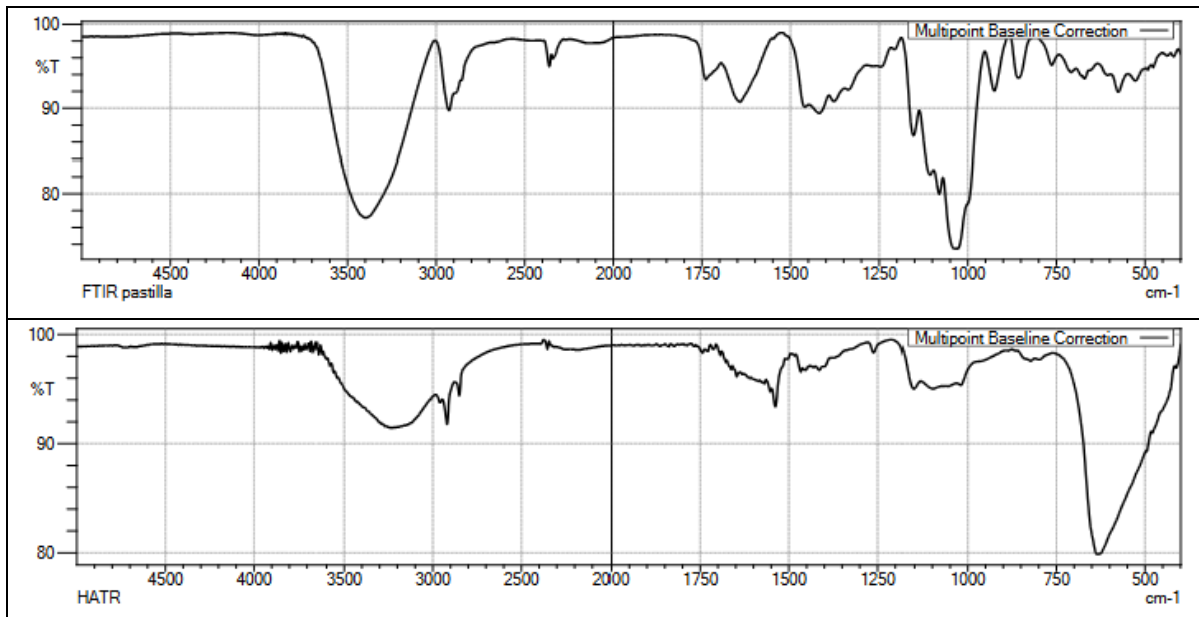


Figura 9. espectro IR con KBr y HATR de la película 2E

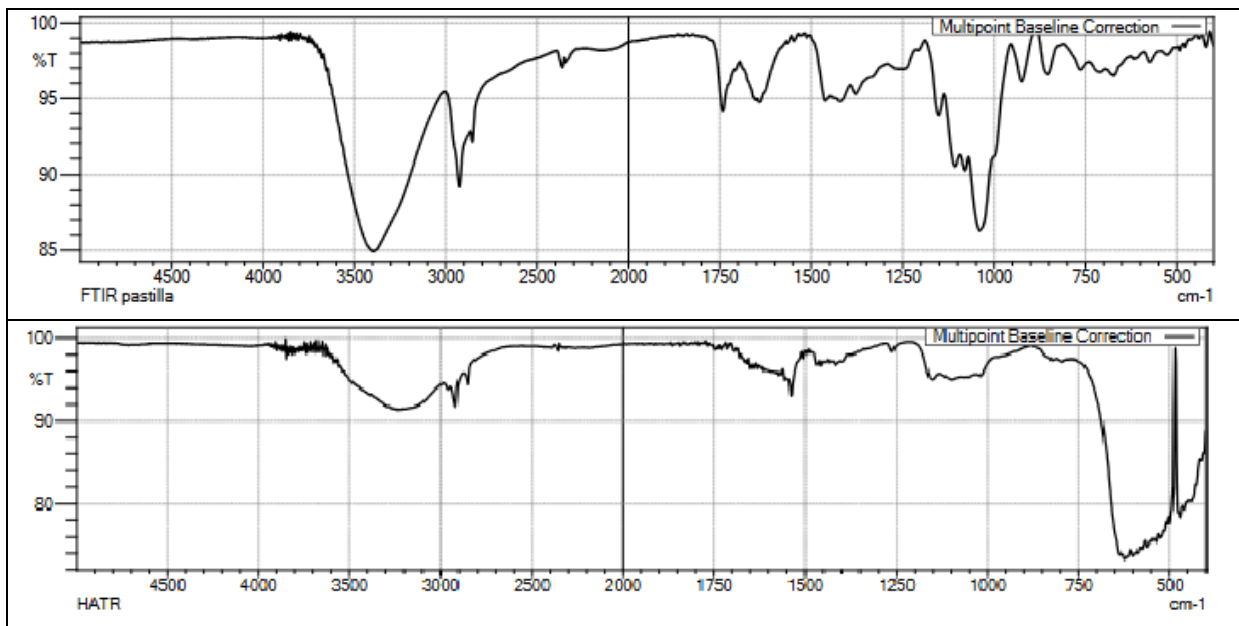


Figura 10. espectro IR con KBr y HATR de la película PB5

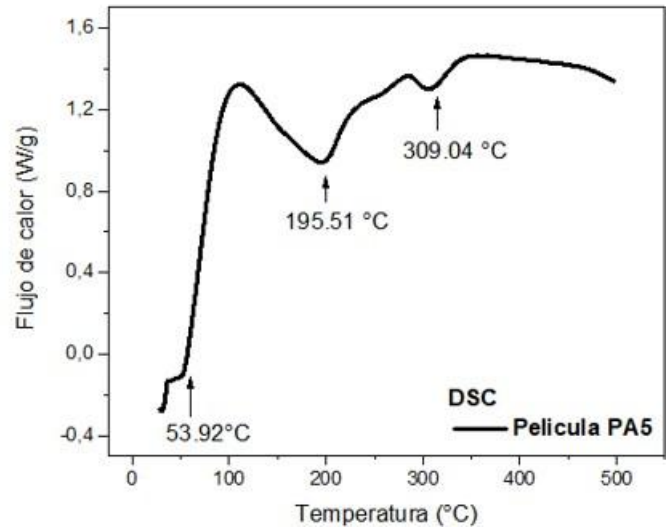
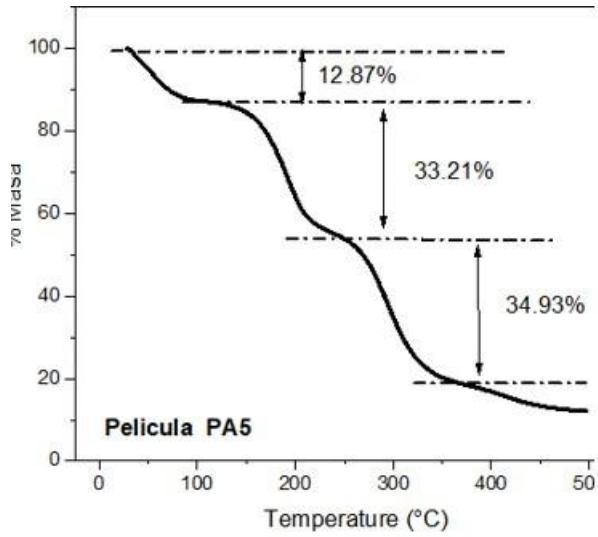


Figura 11. Resultado calorimetricos de la pelicula PA5

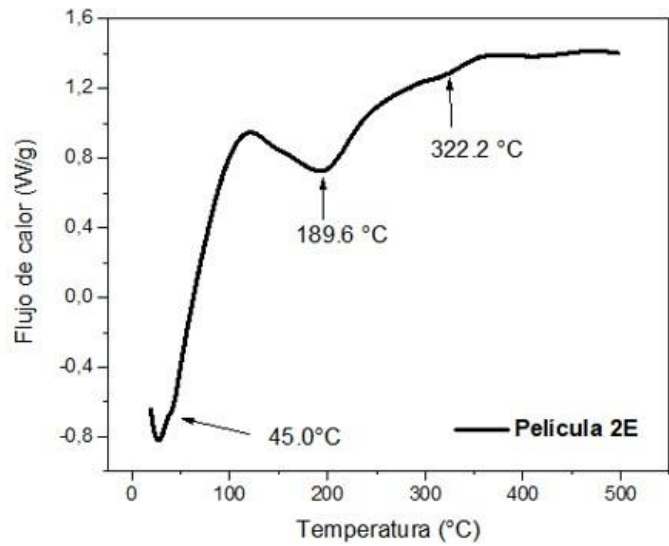
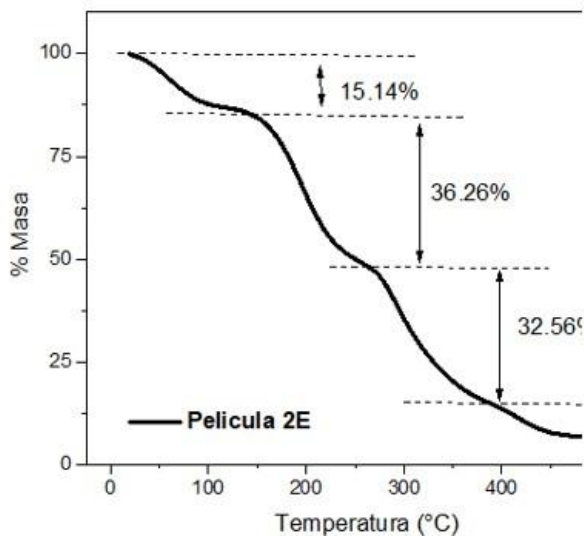


Figura 12. resultado calorimétrico de la película 2E