

Universidad Zamorano
Departamento de Agroindustria Alimentaria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



Proyecto Especial de Graduación
**Desarrollo y caracterización de películas inteligentes a base de alcohol
polivinílico funcionalizadas con betacianinas extraídas de cáscara de
remolacha (*Beta vulgaris L.*)**

Estudiante

Gamanuel Jean

Asesores

Luis F. Maldonado, Ph.D.

Adela Acosta Marchetti, D.Sc.

Honduras, noviembre 2025

Autoridades

KEITH L. ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA ACOSTA MARCHETTI

Directora del Departamento de Agroindustria Alimentaria

JULIO NAVARRO

Secretaría General

Contenido

Índice de Cuadros	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	7
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Materiales y Métodos	13
Localización del Estudio	13
Materias Primas y Materiales	13
Equipos para la Extracción de Betacianinas y la Elaboración y Caracterización de Películas	13
Obtención de la Cáscara Remolacha	14
Etapa 1. Extracción y Cuantificación de Betacianinas	14
Extracción de Betacianinas	14
Etapa 2. Elaboración y Caracterización de las Películas de alcohol Polivinílico con Adición de Extracto de Betacianinas	15
Formulación de las Películas	15
Caracterización de las Películas	16
Análisis de Color (Hunter L*a*b*) (AN 1018.00).	16
Contenido de Humedad, Solubilidad en Agua y Grado de Hinchamiento	17
<i>Permeabilidad</i> de Vapor de Agua	17
Propiedades Mecánicas	18
Sensibilidad al pH	19
Diseño Estadístico	20
Resultados y Discusión	21

Extracción de Betacianinas de Cáscaras de Remolacha.....	21
Resultados del Color y Espesor	22
Espesor.....	22
Color.....	23
Resultados de las Propiedades Hidrofílicas	24
Solubilidad.....	24
Contenido de Agua.....	25
Grado de Hinchamiento.....	25
Permeabilidad de Vapor de Agua	26
Pruebas Mecánicas	27
Resistencia a la Tensión	27
Elongación a la Ruptura	27
Sensibilidad al pH de las Películas Inteligentes.....	28
Estabilidad del Color en el Tiempo	33
Conclusiones	35
Recomendaciones.....	36
Referencias.....	37
Anexos.....	41

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Equipos utilizados para el desarrollo de las películas inteligentes.	13
Cuadro 2 Resultados de análisis espesor y color de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.	23
Cuadro 3 Resultados de propiedades hidrofílicas de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.	25
Cuadro 5 Resultados de sensibilidad al pH de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.	31
Cuadro 6 Resultados de cambio de color en 14 días de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.	34
Cuadro 6 Resultados de cambio de color en 14 días de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas	36

Índice de Figuras

Figura 1 Flujo de Proceso para la elaboración de las películas de alcohol polivinílico con y sin adición de extracto de betacianinas.....	16
Figura 2 Croma por tratamiento en función del pH.....	32

Índice de Anexos

Anexo A Tratamiento 1 (Control).....	41
Anexo B Tratamiento 2 (con 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas)	42
Anexo C Tratamiento 3 (con 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas)	43
Anexo D Prueba de sensibilidad al pH	44
Anexo E Medición del Espesor	45

Resumen

La creciente demanda de alimentos procesados ha impulsado el desarrollo de empaques inteligentes con sensores e indicadores de frescura. Estas tecnologías permiten monitorear el estado del producto y detectar su deterioro. El objetivo del presente estudio fue desarrollar y caracterizar películas inteligentes a base de alcohol polivinílico (APV) funcionalizadas con betacianinas extraídas de cáscara de remolacha (*Beta vulgaris L.*), y evaluar su sensibilidad al pH para aplicaciones como envase inteligente. Se formularon tres tratamientos: Tratamiento sin extracto (T1), tratamiento con 0.14 mg/mL de extracto (T2) y tratamiento con 0.34 mg/mL (T3). Las películas se prepararon mediante el método de "Casting" y se les realizaron análisis de espesor, color, propiedades mecánicas, permeabilidad al vapor de agua, solubilidad y sensibilidad al pH usando un diseño completamente al azar con separación de medias Duncan ($p < 0.05$). La extracción con etanol al 30 % alcanzó 0.779 mg/g de betacianinas totales. Las películas con betacianinas aumentaron el espesor de 0.31 mm (T1) a 0.40 mm (T3), disminuyeron la luminosidad (L^*) de 73.33 a 24.58, y cambiaron los valores a^* de -0.68 a 35.42; asimismo, el croma aumentó de 1.51 a 39.10 ($p < 0.05$). La resistencia a la tensión mejoró de 0.29 MPa (T1) a 0.33 MPa (T3), y la elongación aumentó significativamente de 20.67 % a 35.33 %. Las películas presentaron alta solubilidad (95.91-100%) y permeabilidad al vapor de agua 11.24-16.23 $\times 10^{-7}$ g·mm/m²·s·kPa. Los valores de a^* para las películas con extracto de betacianinas pasaron de valores negativos en pH ácido a valores mayores que 46 en pH alcalino, confirmando su potencial como indicadores visuales para monitorear el deterioro de los alimentos.

Palabras clave: Colorimetría, Permeabilidad, Pigmentos naturales, Polímeros funcionales, Sensores de frescura.

Abstract

The increasing demand for processed food has driven the development of smart packaging with sensors and freshness indicators. These technologies allow monitoring product status and detecting spoilage. The objective of this study was to develop and characterize smart films based on polyvinyl alcohol (PVA) functionalized with betacyanins extracted from beetroot peel (*Beta vulgaris* L.), and to evaluate their pH sensitivity for smart packaging applications. Three treatments were formulated: Treatment without extract (T1), treatment with 0.14 mg/mL of extract (T2), and treatment with 0.34 mg/mL (T3). The films were prepared by the casting method and analyzed for thickness, color, mechanical properties, water vapor permeability, solubility, and pH sensitivity using a completely randomized design with Duncan means separation ($p < 0.05$). Extraction with 30 % ethanol yielded 0.779 mg/g of total betacyanins. The betacyanin-containing films increased in thickness from 0.31 mm (T1) to 0.40 mm (T3), decreased lightness (L^*) from 73.33 to 24.58, and changed a^* values from -0.68 to 35.42; also, the chroma increased from 1.51 to 39.10 ($p < 0.05$). The tensile strength improved from 0.29 MPa (T1) to 0.33 MPa (T3), and the elongation increased significantly from 20.67 % to 35.33 %. The films showed high solubility (95.91-100%) and water vapor permeability $11.24-16.23 \times 10^{-7}$ g mm/m².s.kPa. The a^* values for the films containing betacyanin extract changed from negative values under acidic pH to values higher than 46 under alkaline pH, confirming their potential as visual indicators for monitoring food spoilage.

Keywords: Colorimetry, Freshness sensors, Functional polymers, Natural pigments, Permeability.

Introducción

La creciente demanda de alimentos procesados y la necesidad de prolongar su vida útil han impulsado el desarrollo de empaques inteligentes en el sector alimentario. Estos sistemas de empaque incorporan tecnologías avanzadas como sensores, indicadores de frescura y materiales activos que permiten monitorear el estado del producto, detectar deterioro y mantener la calidad alimentaria durante el almacenamiento y transporte.

Entre los polímeros biodegradables disponibles, el alcohol polivinílico (APV) ha sido ampliamente investigado como matriz polimérica debido a su alta solubilidad en agua, transparencia, biodegradabilidad y excelente capacidad para formar películas (Rahman y Goswami, 2023). Sin embargo, las películas de APV puro presentan limitaciones significativas en términos de propiedades mecánicas y funcionalidades activas, lo que restringe su aplicación directa en el envasado de alimentos perecederos. Esta deficiencia ha motivado la incorporación de compuestos bioactivos que puedan conferir propiedades funcionales adicionales a la matriz polimérica.

Recientemente, se ha incrementado el interés en incorporar compuestos bioactivos de origen natural a matrices de empaque, destacando pigmentos vegetales como las betalaínas. Estos pigmentos nitrogenados hidrosolubles están presentes en especies de la familia Amaranthaceae, especialmente en la remolacha (*Beta vulgaris* L.). Se clasifican en dos grupos: Betacianinas que otorgan tonalidades rojas o púrpuras, y betaxantinas, de color amarillo-anaranjado (Abedi-Firoozjah et al., 2023). La relevancia de las betalaínas trasciende su función como colorantes naturales, ya que presentan propiedades antioxidantes, antimicrobianas y sensibilidad a cambios de pH, lo que las convierte en agentes funcionales idóneos para películas activas e inteligentes (Cejudo-Bastante et al., 2020).

La revalorización de subproductos agroindustriales como fuente de compuestos funcionales representa una estrategia valiosa para promover la economía circular y reducir los costos de producción. En este contexto, la cáscara de remolacha, comúnmente descartada durante el

procesamiento industrial, constituye una fuente accesible y rica en betalaínas que podría aprovecharse para la funcionalización de matrices poliméricas. Investigaciones han demostrado que extractos obtenidos de residuos vegetales pueden integrarse con éxito en matrices poliméricas, mejorando sus propiedades fisicoquímicas y aportando funcionalidades de indicador de deterioro (Chaari et al., 2022).

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de betalaínas a matrices de APV puede modificar significativamente las propiedades de las películas resultantes. A nivel óptico, se ha observado un aumento en la intensidad del color y una mejora en la capacidad de bloqueo a la radiación UV, características esenciales para preservar alimentos fotosensibles (Qin, Liu, et al., 2020). Las propiedades mecánicas también se ven influenciadas por la interacción entre los grupos funcionales de las betalaínas y la matriz polimérica, lo que puede mejorar la resistencia a la tensión, la elasticidad y la barrera al vapor de agua (Rodríguez-Félix et al., 2022).

Una aplicación destacada de estas películas es su uso como indicadores visuales de frescura, ya que las betalaínas cambian de color ante variaciones en el pH o la presencia de aminas volátiles, lo cual permite su utilización como sensores colorimétricos para monitorear el deterioro de alimentos cárnicos o marinos (Abedi-Firoozjah et al., 2023).

La literatura ha establecido que las propiedades finales de estas películas dependen de diversos factores críticos, como el tipo de betalaína utilizada, la concentración del extracto, la técnica de incorporación y las condiciones de procesamiento. Películas formuladas con combinaciones de APV y gelatina han mostrado cambios de color perceptibles durante el almacenamiento de carne refrigerada, confirmando su funcionalidad como indicadores visuales (Abdolmaleki et al., 2024). Además, se ha establecido que el tipo y origen botánico de la betalaína afecta las propiedades físicas, mecánicas y de barrera de las películas. Diferentes perfiles de betacianinas, como betanina (remolacha), gomfrerina (amaranto) o indicaxantina (tuna), confieren propiedades estructurales y funcionales distintas (Yao et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que el proceso de extracción de betalaínas puede optimizarse para maximizar su rendimiento y estabilidad. Factores como temperatura, tiempo y tipo de solvente inciden directamente en la eficiencia del proceso, como lo demostraron Zin et al. (2021) al obtener altos rendimientos antioxidantes de la cáscara de remolacha utilizando disolventes acuoso-alcohólicos a temperaturas moderadas. Asimismo, la incorporación de antioxidantes naturales como las betalaínas puede mejorar la estabilidad térmica y la resistencia al deterioro de materiales de empaques, como lo evidenciaron Drohsler et al. (2021) al estudiar matrices de polilactida y policaprolactona estabilizadas con extractos de remolacha. El uso de sistemas de liberación controlada o la encapsulación de betalaínas en matrices como bentonita puede incrementar su estabilidad frente a la fotodegradación, extendiendo la vida funcional de las películas (Kaba et al., 2020).

A pesar de los avances reportados en la literatura, existe un vacío de conocimiento específico respecto a la caracterización integral de películas de APV funcionalizadas con betalaínas extraídas específicamente de cáscara de remolacha, particularmente en términos de la optimización de las condiciones de extracción y su impacto en las propiedades funcionales de las películas resultantes. Además, la evaluación de estas películas como sistemas inteligentes para el envasado de productos perecederos requiere de estudios más profundos que correlacionen las propiedades fisicoquímicas con el desempeño real en condiciones de almacenamiento.

En este contexto, la presente investigación tuvo como propósito desarrollar películas inteligentes a base de alcohol polivinílico funcionalizadas con betalaína (Betacianinas) extraídas de cáscara de remolacha (*Beta vulgaris L.*) y caracterizar las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y sensibilidad al pH de estas películas, con el fin de evaluar su aplicabilidad como indicador de frescura para el envasado de alimentos perecederos. Este enfoque contribuirá al desarrollo de soluciones sostenibles de empaque que aprovechen subproductos agroindustriales locales, promoviendo la economía circular y ofreciendo una alternativa viable a los materiales de empaque sintéticos convencionales.

Materiales y Métodos

Localización del Estudio

Este estudio se realizó en el Departamento de Agroindustria de la Universidad Zamorano. Las muestras de cáscara de remolacha fueron obtenidas de la Planta Hortofrutícola. La extracción de betacianinas, así como la elaboración y la caracterización de las películas fue realizada en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ).

Materias Primas y Materiales

Para el desarrollo de las películas y la extracción de betacianinas, se utilizó la cáscara de remolacha. Además, se utilizaron otros materiales y reactivos tal que alcohol polivinílico (APV) como polímero base, glicerol como plastificante, etanol al 30 %, agua desionizada, ácido clorhídrico (HCl) 1M, hidróxido de potasio, fosfato de potasio. Para el desarrollo experimental se utilizaron materiales tales como platos Petri, pipetas, probetas, beakers, frascos.

Equipos para la Extracción de Betacianinas y la Elaboración y Caracterización de Películas

En el Cuadro 1, se enumeran los equipos utilizados para la extracción de betacianinas y para la elaboración y caracterización de las películas.

Cuadro 1

Equipos utilizados para el desarrollo de las películas inteligentes.

Equipo	Marca/Modelo
Espectrofotómetro	Agilent Cary 8454
Balanza analítica	OHAUS, máximo 110 y d= 0.1mg
Texturómetro	CT3 Brookfield
Horno de convección forzada	Napco, 630
Colorímetro	Colorflex Hunter LAB
Micrómetro digital	Mitutoyo modelo H-2780
Centrifugadora	VWR Symphony 4417
Licuada	Oster
Agitador magnético	Thermo Scientific
Cámara de ventilación	Kalstein
Potenciómetro	pH meter digital

El Proceso de la investigación se dividió en dos etapas con el objetivo de establecer parámetros óptimos, las cuales se definieron de la siguiente manera:

Etapa 1: Extracción y cuantificación de betacianinas.

Etapa 2: Elaboración y caracterización de las películas de alcohol polivinílico con adición de extracto de betacianinas.

Obtención de la Cáscara Remolacha

Para la toma de las muestras de cáscara de remolacha fresca en la planta hortofrutícola, se recolectó aproximadamente 1 kg de cáscara proveniente del descarte del área de procesamiento. La recolección se realizó en bolsas de color negro para evitar el contacto directo con la luz solar y preservar sus compuestos. Posteriormente, las cáscaras fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano y se almacenaron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas para su conservación antes del procesamiento posterior.

Etapa 1. Extracción y Cuantificación de Betacianinas

Extracción de Betacianinas

Para la extracción de betacianinas totales se empleó el método descrito por Qin, Liu, et al. (2020), con algunas modificaciones. Se tomaron 300 g de cáscaras, las cuales fueron trituradas en una licuadora y posteriormente extraídas con 800 mL de una solución de etanol al 30 % (V/V). Con ayuda de un agitador magnético, la mezcla se mantuvo en agitación constante durante dos horas. La mezcla obtenida fue filtrada utilizando una malla fina para separar las partículas de mayor tamaño. El extracto crudo se distribuyó en tubos de ensayo y se sometió a centrifugación de 6000 rpm durante 15 minutos. Finalmente, el sobrenadante resultante fue recolectado y almacenado a $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su uso en los análisis posteriores.

Cuantificación de Betacianinas

Para la cuantificación de betacianinas se utilizó un espectrofotómetro UV-visible (modelo DR/2400), registrando los valores de absorbancia a una longitud de onda de 535 nm, de acuerdo con lo descrito por Singh et al. (2022). Las muestras fueron previamente diluidas en una proporción 1:10 (extracto:agua) con agua desionizada, con el fin de obtener lecturas dentro del rango lineal de

absorbancia del equipo. La concentración de betacianinas (BC) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$BC = \frac{A \times MW \times V \times DF \times 1000}{\epsilon \times L \times M} \quad [1]$$

Donde A corresponde a la absorbancia medida a 535 nm, Mw es el peso molecular de la betanina (550 g/mol). V es el volumen del extracto en Litros, DF el factor de dilución aplicado que es 10 en este caso, ϵ el coeficiente de extinción molar ($60,000 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) para la betanina, L es la longitud de la celda (1 cm) y M es el peso fresco del material de extracción en gramos. Los resultados se expresaron en mg de betacianina equivalente por litro de extracto.

Etapla 2. Elaboración y Caracterización de las Películas de alcohol Polivinílico con Adición de

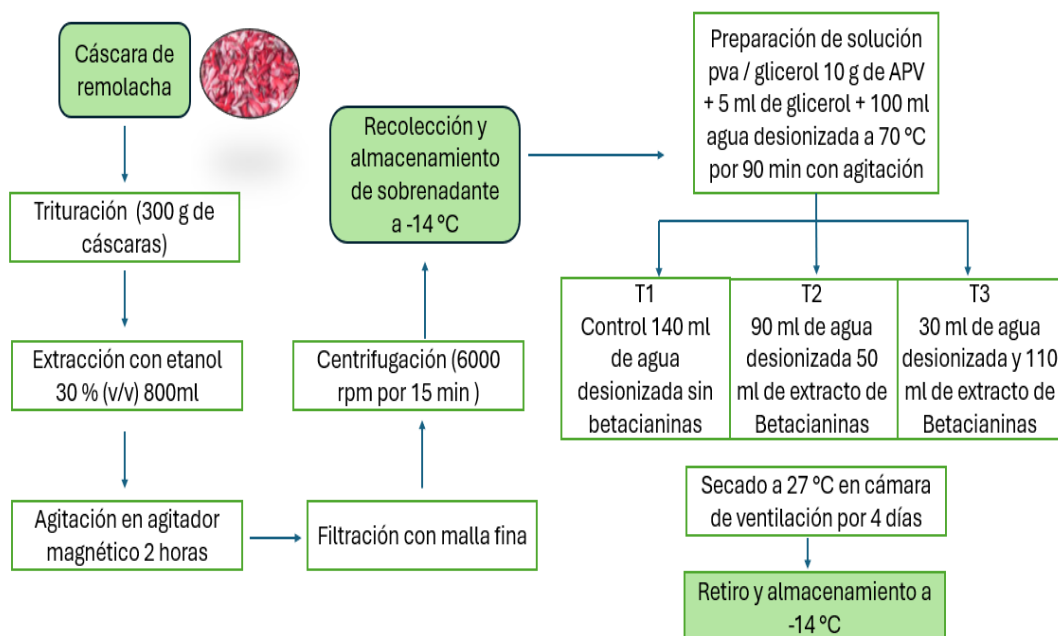
Extracto de Betacianinas

Formulación de las Películas

Las películas a base de APV/glicerol con y sin extracto de betacianinas se prepararon siguiendo este método, brevemente, 10 g de APV se disolvieron completamente en 100 mL de agua desionizada a 70 °C bajo agitación constante con un agitador magnético durante 90 minutos. Posteriormente, se añadieron 5 mL de glicerol como plastificante y diferentes volúmenes de extracto acuoso etanólico de remolacha, previamente obtenido y estandarizado. Los tratamientos fueron: Tratamiento control (1) (0 mg/mL de extracto de cáscaras de remolacha), Tratamiento 2 (50 mL de extracto; 0.14 mg/mL) y Tratamiento 3 (110 mL de extracto; 0.34 mg/mL). El volumen final se ajustó a 250 mL con agua desionizada. Se vertieron 33 mL de solución en cada placa Petri de 90 mm, las cuales se secaron a 27 °C durante cuatro días en una cámara de ventilación. Finalmente, las películas fueron despegadas cuidadosamente y almacenadas a $-14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su análisis.

Figura 1

Flujo de Proceso para la elaboración de las películas de alcohol polivinílico con y sin adición de extracto de betacianinas.



Caracterización de las Películas

Espesor.

El espesor de las películas se determinó utilizando un micrómetro digital Mitutoyo modelo H-2780, resolución 0.00005 mm. Pevio a la medición se cortaron las películas en dimensiones de 3 × 3 cm. Para cada unidad experimental se realizaron cinco mediciones distribuidas de la siguiente manera: dos en extremos opuestos y una en el centro de la muestra. El espesor final se calculó como el promedio aritmético de estas cinco mediciones.

Análisis de Color (Hunter L*a*b*) (AN 1018.00).

Las características de color de las películas fueron evaluadas utilizando un Colorímetro ColorFlex Hunter Lab® (AN 1018.00). La luminosidad de las películas se midió usando el valor L, empleando una escala donde 100 representa el blanco y 0 representa el negro. Los valores positivos de a* representan la presencia de color rojo, mientras que los valores negativos representan la presencia de color verde. De manera similar, cuando los valores de b* son positivos, indica la presencia

de amarillo, mientras que los valores negativos indican la existencia de azul. Las mediciones se realizaron colocando las muestras de película sobre un fondo estándar blanco.

Contenido de Humedad, Solubilidad en Agua y Grado de Hinchamiento

La determinación del contenido de agua y la solubilidad en agua de las películas se realizó siguiendo metodologías previamente validadas (Sohany et al., 2021). El procedimiento inició con el corte y pesaje preciso de cada muestra de película hasta 0.001 g, valor que se denominó peso inicial (M1). Para establecer el contenido de materia seca inicial, las muestras se deshidrataron en un horno a 105 °C por un período de 24 horas, obteniendo el peso seco final (M2).

A continuación, las películas se colocaron en agua desionizada y se mantuvieron en inmersión durante 24 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo, las fracciones de película no solubilizadas se recuperaron cuidadosamente con espátula, se dejaron secar por un tiempo para eliminar el exceso de agua y se pesaron como (M3). Finalmente, estas fracciones residuales se secaron nuevamente a 105 °C durante 24 horas para obtener su peso seco final (M4). Las propiedades hidrofílicas se calcularon aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Contenido de agua (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \quad [2]$$

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{M2 - M4}{M2} \times 100 \quad [3]$$

$$\text{Grado de Hinchamiento (\%)} = \frac{M3 - M2}{M2} \times 100 \quad [4]$$

Permeabilidad de Vapor de Agua

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) se evaluó mediante el método gravimétrico siguiendo metodologías establecidas. Para este propósito, se utilizaron frascos de vidrio con diámetro interior de 76 mm, cuyo peso en vacío se determinó previamente. A cada frasco se le agregaron 80 mL de agua desionizada y se registró nuevamente el peso del conjunto frasco-agua. Las películas se pesaron individualmente antes de ser empleadas para sellar herméticamente la boca de cada frasco,

asegurando que no existieran aberturas que permitieran el escape de vapor de agua por otras vías. Los frascos sellados se colocaron en un desecador que contenía gel de sílice para mantener un ambiente de baja humedad relativa, y durante un período de siete días se realizaron mediciones cada 24 horas del peso de cada frasco para determinar la pérdida de agua a través de las películas. El área expuesta de cada película se calculó a partir del diámetro interior del frasco mediante la ecuación $A=\pi r^2$, donde r es el radio interior del frasco (0.038 m) y $\pi=3.1416$ obteniéndose un área de $4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. La permeabilidad al vapor de agua se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$PVA = \frac{\Delta m x}{A \Delta t \Delta p} \quad [5]$$

Donde:

Δm = cambio de masa de agua (g) durante el tiempo del ensayo

x = espesor de la película (m)

A = área expuesta de la película (m^2)

Δt = tiempo del ensayo

Δp = diferencia de presión parcial de vapor de agua entre el interior del frasco (100 % HR) y el exterior (≈ 0 % HR) en kPa. la diferencia que dio 3.171 kPa.

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la Tensión.

La resistencia a la tensión se evaluó utilizando el texturómetro CT3 Brookfield. Para esta prueba, las muestras de película se cortaron en dimensiones de 2×5 cm para proporcionar una geometría adecuada al ensayo. Pevio a cada medición, se determinó el espesor de cada muestra utilizando el micrómetro digital para calcular el área de la sección transversal necesaria en la fórmula.

El procedimiento consistió en fijar los extremos de cada muestra en las mordazas del texturómetro, asegurando una distancia inicial estándar entre las mismas. Se aplicó una fuerza de tensión constante a una velocidad de 2 mm/s hasta alcanzar el punto de ruptura de la película. La

resistencia a la tensión se calculó como la fuerza máxima registrada dividida entre el área de la sección transversal de la muestra.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [6]$$

Donde:

σ = Resistencia a la tensión (MPa o N/mm²)

F = Fuerza máxima aplicada hasta la ruptura (N)

A = Área de sección transversal = Ancho × Espesor (mm²)

Elongación a la Ruptura.

La elongación a la ruptura se determinó utilizando el texturómetro CT3 Brookfield. Para este ensayo, las películas se cortaron en dimensiones de 2 × 5 cm, con el fin de mantener la misma geometría que en la prueba de resistencia a la tensión. Previo a cada medición, se registró el espesor de las muestras con un micrómetro digital para considerar la sección transversal en los cálculos.

Cada muestra se fijó firmemente en las mordazas del texturómetro, manteniendo una distancia inicial estándar longitud inicial (L_0) entre los puntos de sujeción. Se aplicó una velocidad constante de 2 mm/s hasta que se produjo la ruptura de la película. La elongación a la ruptura se calculó a partir del alargamiento máximo registrado (L_f) utilizando la ecuación:

$$\text{Elongación a la ruptura}(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad [7]$$

Sensibilidad al pH

La sensibilidad al pH de las películas se evaluó siguiendo la metodología de Akter et al. (2024), con modificaciones. Se prepararon soluciones tampón a pH 3, 5, 7, 9 y 12 utilizando tampones comerciales Veto (pH 7 y 9) y soluciones preparadas con KOH 1M, fosfato de potasio y HCl 1M para los demás valores. Los pH fueron verificados con potenciómetro.

Las películas (4 × 4 cm) se sumergieron individualmente en 15 mL de cada solución tampón durante 5 minutos a temperatura ambiente, se secaron 10 – 15 minutos y se analizaron

colorimétricamente usando el ColorFlex Hunter Lab® (AN 1018.00) para determinar valores L*, a* y b*. Todo el procedimiento se realizó por triplicado para cada tratamiento para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

Diseño Estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres tratamientos y tres repeticiones, para un total de 9 unidades experimentales. Los datos se procesaron mediante el programa Statistical Analysis System (SAS) Versión 9.4, y las diferencias entre medias se evaluaron utilizando la prueba de rango múltiple de Duncan, considerando un nivel de significancia de 5 % ($p < 0.05$). Los resultados se expresaron como promedio \pm desviación estándar (DE).

Resultados y Discusión

Extracción de Betacianinas de Cáscaras de Remolacha

La extracción de betacianinas a partir de cáscaras de remolacha (*Beta vulgaris L.*) con etanol al 30 % alcanzó una concentración notable de 0.779 mg/g. Para dimensionar este resultado, es útil compararlo con estudios previos que emplearon diferentes solventes y materias primas. Akter et al. (2024) trabajaron con pulpa de remolacha fresca obteniendo concentraciones menores: metanol (0.00417 mg/g), etanol puro (0.00371 mg/g) y agua desionizada (0.00310 mg/g). En contraste, Qin, Liu, et al. (2020) obtuvieron resultados más cercanos trabajando con cáscaras de pitaya roja, alcanzando 0.56 mg/g con un método similar. La concentración obtenida en el presente estudio supera los valores reportados tanto por (Akter et al., 2024) como los de Qin, Liu, et al. (2020), sugiriendo que las cáscaras de remolacha constituyen una fuente particularmente rica en betacianinas y que el etanol al 30 % representa un solvente altamente eficiente para la extracción de estos pigmentos.

Las betalaínas son pigmentos polares solubles en solventes polares como agua, etanol y metanol (Spórna-Kucab et al., 2019). Aunque el metanol es tradicionalmente más efectivo por su capacidad de disolver compuestos hidrofílicos y disgregar membranas celulares (Flores-Mancha et al., 2020), el etanol también demuestra considerable eficacia al solubilizar tanto compuestos polares como no polares, obteniendo un espectro más amplio de pigmentos bioactivos (Gil-Martín et al., 2022). El mayor rendimiento obtenido se atribuye a varios factores metodológicos: el uso de cáscaras como fuente rica en betalaínas (Priatni y Pradita, 2015), la reducción del tamaño de partícula que incrementa el área superficial, la concentración óptima de etanol (30 %), y el proceso de agitación de dos horas con centrifugación que facilita una extracción más eficiente comparado con la maceración de 24 horas a 4 °C de Akter et al. (2024). La elección del etanol es ventajosa para aplicaciones alimentarias por ser un solvente de grado alimenticio con menor toxicidad que el metanol, haciéndolo más seguro para materiales en contacto con alimentos (Flores-Mancha et al., 2020).

Resultados del Color y Espesor

Espesor




En el presente estudio se evaluó el efecto de la adición de betacianina en la formulación de películas de alcohol polivinílico, observándose una tendencia clara de incremento del espesor a medida que aumentó la concentración del pigmento (Cuadro 1). El tratamiento control (T1, sin betacianina) presentó un espesor de 0.3075 ± 0.0019 mm, mientras que los tratamientos T2 (0.14 mg/mL de extracto) y T3 (0.34 mg/mL de extracto) alcanzaron espesores de 0.3817 ± 0.0030 mm y 0.4039 ± 0.0029 mm, respectivamente. Esta tendencia coincide con los hallazgos de Akter et al. (2024), quienes reportaron que las películas de alcohol polivinílico (APV) incorporadas con betacianina extraída de remolacha mostraron un aumento significativo en el espesor en comparación con las películas control (120.79 ± 0.52 μm en el control frente a 125.23 ± 0.75 μm y 126.36 ± 0.47 μm en películas con extractos (etanólico y metanólico) debido a interacciones entre las betacianinas y la matriz polimérica. De manera similar, Jamróz et al. (2019) evidenciaron que la adición de extractos de remolacha, saúco y mora en películas de Furcellaran incrementó su espesor, atribuyéndolo a la formación de redes internas más intrincadas.

Otros estudios también respaldan esta relación, Hu et al. (2020) encontraron que el uso de extracto de amaranto rico en betacianinas aumentó notablemente el espesor de películas elaboradas con quitosano amonio/cuaternario y gelatina de pescado, y Naghdi et al. (2021), reportaron un aumento considerable del espesor en películas de almidón tras la adición de betacianinas procedentes de "paperflower". En este caso, los coeficientes de variación calculados (0.618 para T1; 0.788 para T2 y 0.721 para T3) reflejan cierta dispersión, probablemente asociada a pequeñas diferencias en la preparación de las muestras o en la distribución del pigmento dentro de la matriz, tal como también sugirieron Akter et al. (2024). El aumento de espesor observado tiene implicaciones directas sobre las propiedades funcionales de las películas, ya que un espesor mayor suele correlacionarse con mayor resistencia mecánica y menor permeabilidad al vapor de agua características deseables en envases

inteligentes, aunque también puede afectar la flexibilidad y la transparencia, por lo que resulta necesario optimizar este parámetro en función del uso final previsto. Esto puede observar en el Cuadro 2, donde se muestran los valores de espesor obtenidos para cada tratamiento.

Cuadro 2

Resultados de análisis espesor y color de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.

Tratamiento	Espesor	L*	a*	b*	C*	h	Color
T1	0.31 ± 0.0019 ^c	73.33 ± 0.21 ^a	-0.68 ± 0.18 ^b	1.35 ± 0.32 ^c	1.51 ± 0.37 ^c	2.03 ± 0.009 ^a	
T2	0.38 ± 0.0030 ^b	39.65 ± 0.04 ^b	35.34 ± 0.26 ^a	37.55 ± 0.71 ^a	51.56 ± 0.68 ^a	0.81 ± 0.006 ^b	
T3	0.40 ± 0.0029 ^a	24.58 ± 0.25 ^c	35.42 ± 0.59 ^a	16.56 ± 0.71 ^b	39.10 ± 0.82 ^b	0.43 ± 0.010 ^c	
CV	0.73	0.4	1.64	3.3	2.13	0.82	
P	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

Nota. Datos presentados como media ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes dentro de la misma columna indican diferencias

significativas ($P < 0.05$). CV: Coeficiente de variación. D.E.: desviación estándar. L*: luminosidad (0 = negro, 100 = blanco). a*: cromaticidad verde-rojo (aprox. -60 = verde, +60 = rojo). b*: cromaticidad azul-amarillo (aprox. -60 = azul, +60 = amarillo). C*: Crom. h: Ángulo de tono.

P: Probabilidad. T1: Tratamiento control (sin extracto). T2: Tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: Tratamiento 3 (0.34 mg/mL).

Color

El color de los empaques alimentarios juega un papel crucial en la percepción sensorial y en las decisiones de compra de los consumidores, ya que transmite atributos como frescura, calidad y atractivo visual. Diversos estudios demuestran que el color del envase puede modificar las expectativas de sabor y la aceptación del producto, influyendo incluso en la disposición a consumirlo (Wang y Chang, 2022).

Como se puede apreciar en el Cuadro 2, se observan diferencias significativas en los parámetros de color entre los tratamientos. El valor de luminosidad (L*) fue más elevado en T1 (73.33 ± 0.21), lo que indica una mayor claridad y apariencia más brillante, mientras que T3 (24.58 ± 0.25) presentó la menor luminosidad, reflejando una tonalidad más oscura y opaca. El parámetro a* mostró un cambio notable: T1 exhibió valores cercanos a cero (-0.68 ± 0.18), lo que corresponde a un matiz verdoso-grisáceo, mientras que los tratamientos con adición de betacianinas (0.14 mg/mL y 0.34 mg/mL) alcanzaron valores positivos (35.34 ± 0.26 y 35.42 ± 0.59, respectivamente), indicando un

viraje hacia tonalidades rojizas. Por su parte, el componente b^* evidenció una marcada diferencia, el tratamiento con 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas alcanzó el valor más alto (37.55 ± 0.71), reflejando una intensa tonalidad amarilla, en contraste con el tratamiento 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas (16.56 ± 0.71) y el control (1.35 ± 0.32), que mostraron menor saturación hacia el eje amarillo-azul.

El croma (C^*), que expresa la saturación o viveza del color, también diferenció los tratamientos ($p < 0.05$). El tratamiento con 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas presentó el mayor valor (51.56 ± 0.68), lo que sugiere un color más intenso y llamativo, mientras que el tratamiento control (sin betacianinas) registró la menor saturación (1.51 ± 0.37), asociado con una apariencia más apagada y neutra. Este comportamiento confirma que la formulación de cada tratamiento impacta directamente en la expresividad del color, generando desde películas transparentes y brillantes (control) hasta recubrimientos con tonos oscuros y rojizos (tratamiento con 0.34 mg/mL de betacianinas).

Resultados de las Propiedades Hidrofílicas

Solubilidad

En empaques poliméricos, la solubilidad describe la afinidad de moléculas (como agua y oxígeno) por el material, siendo un factor clave en su permeabilidad. Los valores de solubilidad en agua (WS) oscilaron entre 95.91 % y 100%, mostrando diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.0001$). En el Cuadro 3 los resultados indican que las películas son altamente solubles en agua, alcanzando la solubilidad máxima para el tratamiento con 0.34 mg/mL de betacianinas. La alta solubilidad de las películas se debe a que están compuestas principalmente por polímeros hidrofílicos como el APV, que interactúan fácilmente con las moléculas de agua (Kanatt, 2020). La ligera disminución de WS observada en el tratamiento control y el tratamiento con 0.14 mg/mL de betacianinas podría estar relacionada con interacciones entre las cadenas poliméricas y los aditivos incorporados, formando enlaces de hidrógeno que reducen el número de grupos hidroxilo libres disponibles para interactuar con el agua (Ghasempour et al., 2022).

Cuadro 3

Resultados de propiedades hidrofílicas de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.

Tratamiento	Solubilidad (%) Media ± D.E.	Contenido de agua (%) Media ± D.E. ^{Ns}	Hinchamiento (%) Media ± D.E.	PVA ($\times 10^{-7}$ g.mm/m ² .s.kpa) Media ± D.E. ^{Ns}
T1	95.91 ± 0.53 ^b	15.34 ± 2.00	46.48 ± 1.36 ^c	11.24±0.59
T2	99.91 ± 0.04 ^a	22.32 ± 3.04	83.34 ± 3.28 ^b	16.23±2.66
T3	100.00 ± 0.00 ^a	21.93 ± 5.91	100.00 ± 0.00 ^a	15.52±3.48
CV	0.31	20.17	2.67	17.79
P	<.0001	0.1332	<.0001	0.1053

Nota. Datos presentados como media ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos (P<0.05). Ns: no significativo (P>0.05). CV: Coeficiente de variación. D.E.: desviación estándar. PVA: Permeabilidad de vapor de agua. P: Probabilidad. T1: Tratamiento control (sin extracto). T2: Tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: Tratamiento 3 (0.34 mg/mL).

Contenido de Agua

Como se muestra en el Cuadro 3, las películas analizadas presentaron un contenido de agua que varió entre 15.34 % y 22.32 %, sin diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.1332$). Esto indica que la incorporación de diferentes concentraciones de betacianinas no afectó significativamente el contenido de humedad de las películas. Hallazgos similares fueron reportados por Kanatt (2020), quien observó que la adición de extractos vegetales a películas de APV/gelatina no alteraba significativamente su contenido de humedad, probablemente debido a la estructura compacta de la matriz polimérica. Por el contrario, Singh et al. (2022) demostraron que el aumento de la concentración de betacianinas de remolacha en películas basadas en polisacáridos reducía el contenido de agua debido a la formación de enlaces de hidrógeno entre el pigmento y las cadenas del polímero, disminuyendo así la interacción agua-polímero.

Grado de Hinchamiento

El grado de hinchamiento varió entre 46.48 % para el tratamiento control y 100 % para el tratamiento con mayor contenido de betacianinas (0.34 mg/mL), siguiendo una tendencia similar a la solubilidad. La relación entre la alta solubilidad y el hinchamiento máximo observado sugiere que las películas completamente solubles en agua presentan también la máxima expansión al hidratarse. En

cambio, el tratamiento sin adición de betacianinas presentó un hinchamiento reducido, probablemente debido a la formación de enlaces de hidrógeno intramoleculares que restringen la movilidad de las cadenas poliméricas y limitan la absorción de agua (Wei et al., 2017). Estas observaciones coinciden con estudios previos que muestran que las interacciones entre las cadenas poliméricas y los aditivos bioactivos disminuyen la capacidad de hinchamiento al estabilizar la red interna de la película (Akhter et al., 2019).

Permeabilidad de Vapor de Agua

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) cuantifica la facilidad con que el vapor de agua atraviesa un material, y constituye un parámetro crítico en empaques alimentarios, ya que influye directamente en vida útil del producto. La tendencia sugiere que las películas con mayor contenido de agua y mayor hinchamiento presentan una permeabilidad ligeramente superior al vapor de agua, probablemente debido a la mayor disponibilidad de sitios hidrofílicos para la difusión de vapor (Kan et al., 2019).

En este estudio, los valores de PVA oscilaron entre 11.24×10^{-7} g·mm/m²·s·kPa para el tratamiento control y 16.23×10^{-7} g·mm/m²·s·kPa para el tratamiento con 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas, mientras que el tratamiento con 0.34 mg/mL presentó un valor intermedio de 15.52×10^{-7} g·mm/m²·s·kPa (Cuadro 3). Aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p = 0.1053$), los datos muestran una tendencia consistente, indicando que las películas con mayor contenido de agua y mayor grado de hinchamiento tienden a permitir un paso ligeramente mayor del vapor de agua. Esto se puede atribuir a una mayor disponibilidad de grupos hidrofílicos en la matriz polimérica, que facilitan la absorción y difusión del vapor.

En términos prácticos, estos valores indican que las películas presentan una barrera moderada frente al vapor de agua, suficiente para aplicaciones de empaque donde se busca conservar la humedad sin retenerla excesivamente. La PVA en el rango de 10^{-7} g·mm/m²·s·kPa se considera relativamente baja para películas poliméricas de este tipo, lo que sugiere que los tratamientos

estudiados mantienen la integridad de la barrera hídrica mientras incorporan los extractos funcionales.

Pruebas Mecánicas

Resistencia a la Tensión

Los resultados del Cuadro 4 muestran que la resistencia a la tensión aumentó gradualmente desde el control (0.29 ± 0.023 MPa) hasta alcanzar su máximo en el tratamiento con adición de 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas (0.32 ± 0.022 MPa). Esta tendencia ascendente indica que los tratamientos aplicados fortalecieron la estructura de las películas de manera progresiva. La literatura documenta comportamientos diversos cuando se incorporan compuestos betacianínicos en matrices poliméricas. Investigaciones previas han mostrado que estos pigmentos pueden generar efectos contradictorios dependiendo de su concentración. Hu et al. (2020) observaron un fenómeno bifásico en películas de quitosano cuaternario/gelatina de pescado: las betalaínas de amaranto inicialmente reforzaron la estructura, pero en cantidades excesivas produjeron el efecto opuesto. Los autores explicaron este comportamiento mediante las interacciones específicas entre los grupos hidroxilo presentes en las betalaínas, que modifican la densidad estructural de la matriz.

Resultados similares fueron documentados por Wu et al. (2021) en sistemas de goma de garrofín/APV, donde las betacianinas de cresta de gallo (*Celosia cristata*) mejoraron las propiedades mecánicas hasta cierto umbral, después del cual concentraciones del 12 % comprometieron la uniformidad estructural, reduciendo la resistencia. Este patrón sugiere la existencia de una concentración óptima para maximizar los beneficios mecánicos.

Elongación a la Ruptura

La elongación a la ruptura es cuando un cuerpo es sometido a la acción de fuerzas externas y sufre alargamientos o acortamientos en una dirección dada, los cuales reciben el nombre de deformaciones (Kmilytha, 2011). En el Cuadro 4 se resumen los resultados de las pruebas mecánicas para cada tratamiento. Con respecto a la deformabilidad, medida como elongación a la ruptura, se

documentó una mejora sustancial: desde 20.67 % en el control hasta 35.33 % en el tratamiento con 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas ($p = 0.0078$). Esta progresión indica que los tratamientos no solo mantuvieron, sino que incrementaron la capacidad de deformación de las películas antes del fallo mecánico. La flexibilidad mejorada contrasta con algunos reportes donde los pigmentos betalánicos reducen la deformabilidad. Yao et al. (2021) describieron mejoras simultáneas en resistencia y elongación al incorporar extractos betacianínicos de múltiples especies vegetales en películas de empaque inteligente. Sus hallazgos sugieren que el fortalecimiento estructural y la mayor movilidad molecular pueden coexistir cuando las condiciones de formulación son apropiadas.

Por el contrario, Amjadi et al. (2020) reportaron que sistemas con nanopartículas de betanina exhibieron mayor resistencia, pero menor flexibilidad, atribuido a interacciones polímero-nanopartícula que rigidizaron la red estructural (Rodríguez-Félix et al., 2022).

Cuadro 4

Resultados de las pruebas mecánicas de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.

Tratamiento	Resistencia a la tensión (MPa)	Elongación a la ruptura (%)
	Media \pm D.E. ^{Ns}	Media \pm D.E.
T1	0.29 \pm 0.02	20.67 \pm 3.06 ^b
T2	0.31 \pm 0.03	28.67 \pm 3.06 ^{ab}
T3	0.32 \pm 0.02	35.33 \pm 4.62 ^a
CV	8.23	12.94
P	0.3316	0.0078

Nota. Datos presentados como media \pm desviación estándar. Letras superíndices diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CV: coeficiente de variación. D.E.: desviación estándar. Ns: no significativo ($P > 0.05$) P: probabilidad. T1: tratamiento control (sin extracto). T2: tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: tratamiento 3 (0.34 mg/mL) MPa: mega Pascal.

Sensibilidad al pH de las Películas Inteligentes

Los resultados obtenidos demuestran que las películas desarrolladas exhiben una notable sensibilidad al pH, manifestándose a través de cambios cromáticos significativos que pueden ser cuantificados mediante análisis colorimétrico. Esta propiedad los posiciona como candidatos para aplicaciones en el monitoreo de la calidad de alimentos, lo cual es consistente con estudios previos

que han demostrado la efectividad de filmes sensibles al pH en aplicaciones de empaques inteligente (Zhang et al., 2021).

El análisis de los parámetros colorimétricos reveló variaciones sistemáticas en función del pH del medio (Cuadro 5). Los valores de L^* (luminosidad) mostraron una tendencia general de aumento con el incremento del pH, particularmente evidente en los tratamientos con adición de extracto de betacianinas, lo que es consistente con las observaciones reportadas por Otálora González et al. (2022), quienes encontraron variaciones similares en películas de almidón de yuca incorporados con betalaínas. Para el tratamiento Control, los valores de L^* se mantuvieron relativamente estables, alrededor de 74 – 75, sugiriendo que este tratamiento presentó menor sensibilidad a los cambios de pH en términos de luminosidad.

Los valores de a^* (componente rojo-verde) experimentaron las modificaciones más significativas, pasando de valores negativos en condiciones ácidas a valores positivos en condiciones alcalinas. Esta transición es particularmente pronunciada en los tratamientos con adición de betacianinas, donde se observó un cambio gradual desde -0.24 hasta valores superiores a 46 en el tratamiento con 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas a pH 12 ($p < 0.05$). Este comportamiento indica una transición cromática desde tonalidades grises hacia rojas conforme aumenta la alcalinidad del medio, fenómeno que ha sido previamente documentado en estudios con films incorporados con pigmentos naturales (Jamróz et al., 2019).

El parámetro b^* (componente amarillo-azul) también mostró variaciones considerables, especialmente en el tratamiento con mayor contenido de betacianinas, donde se registraron valores que oscilaron desde 7.76 en pH ácido hasta 34.47 en pH alcalino ($p < 0.05$). Esta variación sugiere una intensificación del componente amarillo con el aumento del pH, lo cual es consistente con las transformaciones estructurales esperadas en los compuestos bioactivos responsables del color, tal como lo reportaron Akter et al. (2024) en sus estudios sobre la degradación de betacianinas en medio alcalino.

Los cambios observados pueden atribuirse a las modificaciones estructurales que experimentan los pigmentos naturales incorporados en la matriz polimérica en respuesta a las variaciones de pH. En condiciones ácidas, estos compuestos adoptan formas estructurales que favorecen la absorción de luz en ciertas longitudes de onda, mientras que, en condiciones alcalinas, la ionización y reorganización molecular resultan en un espectro de absorción diferente. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado y documentado en la literatura científica, donde se ha demostrado que las betacianinas se transforman de formas catiónicas flavilio a formas quinoides betacianidas bajo diferentes condiciones de pH (Otálora González et al., 2022)

La consistencia en los coeficientes de variación (CV) relativamente bajos para la mayoría de los parámetros (CV < 5 %) indica una buena reproducibilidad de las mediciones y una respuesta uniforme del material a los estímulos de pH, lo cual es crucial para aplicaciones comerciales como lo señalan Qin, Xu, et al. (2020). Sin embargo, es notable que el parámetro a^* presentó mayor variabilidad (CV = 3.24), lo que podría estar relacionado con la mayor sensibilidad de este parámetro a pequeñas variaciones en la estructura molecular de los pigmentos.

La notable sensibilidad al pH observada sugiere que estos films podrían implementarse exitosamente como indicadores visuales de calidad en productos alimentarios. La capacidad de detectar cambios sutiles en el pH del entorno los hace especialmente adecuados para el monitoreo de productos perecederos, donde las variaciones de pH están frecuentemente asociadas con procesos de deterioro microbiano que generan compuestos nitrogenados volátiles como amoníaco, dimetilamina y trimetilamina.

La implementación práctica de estas películas requiere considerar varios aspectos técnicos y comerciales. La respuesta colorimétrica observada debe ser lo suficientemente distintiva para permitir una interpretación visual clara por parte de los consumidores finales. Los datos obtenidos sugieren que los tratamientos con adición de betacianinas ofrecen mayor contraste visual, lo que facilitaría su uso como indicadores de calidad. Otálora González et al. (2022) enfatizaron la

importancia de desarrollar escalas colorimétricas precisas como función de los cambios de pH para mejorar la aplicabilidad en las películas desarrolladas.

Los resultados presentados constituyen una base sólida para el desarrollo de tecnologías de empaques inteligente. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar el comportamiento de estas películas en condiciones reales de almacenamiento, incluyendo variaciones de temperatura, humedad y exposición a la luz, aspectos que han sido identificados como críticos por Yao et al. (2020) Asimismo, será necesario desarrollar escalas colorimétricas estandarizadas que permitan una interpretación consistente de los cambios observados.

La integración de estas películas en sistemas de empaques comerciales requerirá también consideraciones relacionadas con la compatibilidad con diferentes tipos de alimentos, la migración de componentes y el cumplimiento de regulaciones de seguridad alimentaria. No obstante, los resultados obtenidos demuestran el potencial significativo de esta tecnología para contribuir a la reducción del desperdicio alimentario y mejorar la seguridad del consumidor, particularmente en productos ricos en proteínas donde la formación de compuestos nitrogenados volátiles es un indicador clave de deterioro.

Estos resultados se presentan en el Cuadro 5, donde se resumen los valores de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* y b^*) para cada tratamiento y nivel de pH, así como en la Figura 2, donde se ilustra la variación del croma en función del pH.

Cuadro 4

Resultados de sensibilidad al pH de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.

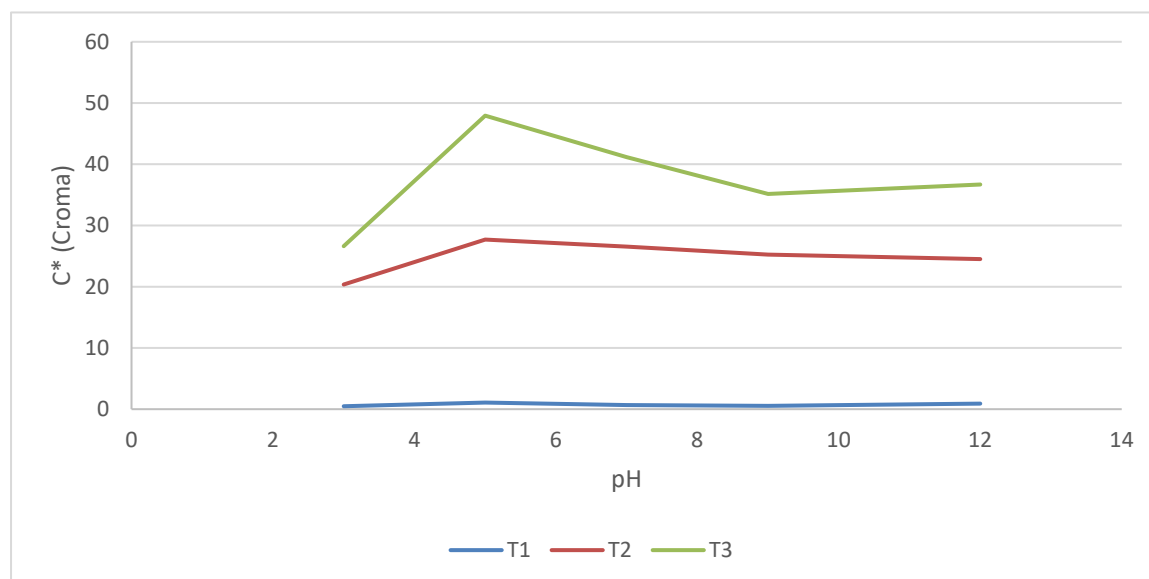
Tratamiento	pH	L^*	a^*	b^*	h	Color
		Media \pm D.E.	Media \pm D.E.	Media \pm D.E.	Media \pm D.E.	
T1	3	75.28 \pm 0.18 ^a	-0.24 \pm 0.28 ^a	0.37 \pm 0.29 ^a	1.91 \pm 0.76 ^a	
T1	5	74.89 \pm 0.17 ^b	-0.94 \pm 0.37 ^a	0.31 \pm 0.51 ^a	2.76 \pm 0.48 ^a	
T1	7	74.77 \pm 0.10 ^b	-0.37 \pm 0.44 ^a	0.17 \pm 0.80 ^a	3.63 \pm 1.20 ^a	
T1	9	74.85 \pm 0.22 ^b	-0.09 \pm 0.62 ^a	0.26 \pm 0.31 ^a	2.62 \pm 1.78 ^a	
T1	12	74.96 \pm 0.05 ^b	-0.69 \pm 0.68 ^a	0.15 \pm 0.46 ^a	2.75 \pm 0.94 ^a	

Tratamiento	pH	L*	a*	b*	h	Color
		Media ± D.E.	Media ± D.E.	Media ± D.E.	Media ± D.E.	
P		0.0217	0.2944	0.9812	0.5039	
T2	3	40.43 ± 0.16 ^d	15.30 ± 0.35 ^d	13.44 ± 0.19 ^d	0.72 ± 0.006 ^c	
T2	5	40.23 ± 0.25 ^d	24.38 ± 0.28 ^a	13.13 ± 0.57 ^d	0.49 ± 0.018 ^e	
T2	7	40.95 ± 0.17 ^c	21.69 ± 0.17 ^b	15.28 ± 0.32 ^c	0.61 ± 0.012 ^d	
T2	9	41.78 ± 0.14 ^b	17.12 ± 0.89 ^c	18.54 ± 0.68 ^b	0.82 ± 0.042 ^b	
T2	12	42.78 ± 0.20 ^a	12.99 ± 0.57 ^e	20.77 ± 0.37 ^a	1.01 ± 0.026 ^a	
P		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	
T3	3	27.18 ± 0.10 ^d	25.47 ± 0.34 ^d	7.76 ± 0.37 ^e	0.29 ± 0.011 ^d	
T3	5	26.73 ± 0.12 ^e	46.73 ± 0.88 ^a	10.66 ± 0.15 ^d	0.22 ± 0.001 ^e	
T3	7	27.56 ± 0.07 ^c	38.23 ± 0.10 ^b	15.25 ± 1.10 ^c	0.37 ± 0.024 ^c	
T3	9	27.99 ± 0.36 ^b	27.61 ± 0.53 ^c	21.75 ± 0.36 ^b	0.66 ± 0.014 ^b	
T3	12	28.86 ± 0.09 ^a	12.55 ± 0.51 ^e	34.47 ± 0.29 ^a	1.22 ± 0.016 ^a	
P		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

Nota. Datos presentados como media ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$). D.E.: desviación estándar. L*: luminosidad (0 = negro, 100 = blanco). a*: cromaticidad verde-rojo (aprox. -60 = verde, +60 = rojo). b*: cromaticidad azul-amarillo (aprox. -60 = azul, +60 = amarillo). P: Probabilidad. C*: Croma. h: Ángulo de tono. T1: Tratamiento control (sin extracto). T2: Tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: Tratamiento 3 (0.34 mg/mL).

Figura 2

Croma por tratamiento en función del pH.



Nota. El croma es un parámetro del espacio de color CIELAB que indica la saturación o intensidad del color. Valores cercanos a 0 representan colores apagados, mientras que valores altos reflejan colores más vivos. T1: tratamiento control (sin extracto). T2: Tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: Tratamiento 3 (0.34 mg/mL).

Estabilidad del Color en el Tiempo







La estabilidad del color en las películas se evaluó durante un período de 14 días para determinar cómo los pigmentos presentes responden a condiciones de almacenamiento. Este análisis es clave para aplicaciones en empaques inteligentes, donde la conservación del color indica integridad del producto y adecuada respuesta a estímulos.

En el Tratamiento 1 (T1, control sin extracto betacianinas), el valor de L^* aumentó de 73.33 ± 0.21 (normal) a 78.50 ± 0.45 (14 días). Este incremento en luminosidad refleja un aclaramiento progresivo de la muestra. De acuerdo con Cairone et al. (2020), el color en alimentos está fuertemente asociado a la composición química y a las condiciones de almacenamiento, pudiendo verse afectado por procesos de blanqueamiento, lo que puede explicar el aumento de intensidad cromática observada en el control. En el Tratamiento 2 (T2, 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas), L^* pasó de 39.65 ± 0.04 a 41.96 ± 0.18 después de 14 días, mostrando un ligero incremento en la claridad. Según Chew et al. (2019), las betacianinas tienden a degradarse más rápidamente que las betaxantinas lo que concuerda con el resultado: al degradarse más las betacianinas (responsables del tono rojo oscuro), el color se vuelve más claro y con predominio de tonos amarillentos (betaxantinas).

En el Tratamiento 3 (T3, 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas), el valor L^* disminuyó de 24.58 ± 0.25 a 23.70 ± 0.36 , mostrando un leve oscurecimiento (Cuadro 6). Este comportamiento, contrario a la simple pérdida de color, sugiere que la degradación del pigmento fue enmascarada por un fenómeno de pardeamiento no enzimático más dominante. Si bien la degradación de las betacianinas por sí sola aumentaría la luminosidad, la formación simultánea de pigmentos oscuros (melanoidinas) provocó el oscurecimiento neto del producto. Kayın et al. (2019) demostraron que la degradación de betacianinas y betaxantinas sigue una cinética de primer orden y que la temperatura acelera el proceso, siendo las betaxantinas más susceptibles al calor. Este comportamiento explica que, a lo largo del almacenamiento, la proporción relativa de pigmentos cambia.

Cuadro 5

Resultados de cambio de color en 14 días de las películas inteligentes con y sin adición de betacianinas.

Día 1						
Tratamiento	L*	a*	b*	C*	h	Color
T1	73.33 ± 0.21 ^a	-0.68 ± 0.18 ^b	1.35 ± 0.32 ^c	1.51 ± 0.37 ^c	2.03 ± 0.009 ^a	
T2	39.65 ± 0.04 ^b	35.34 ± 0.26 ^a	37.55 ± 0.71 ^a	51.56 ± 0.68 ^a	0.81 ± 0.006 ^b	
T3	24.58 ± 0.25 ^c	35.42 ± 0.59 ^a	16.56 ± 0.71 ^b	39.10 ± 0.82 ^b	0.43 ± 0.010 ^c	
CV	0.4	1.64	3.3	2.13	0.82	
P	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	
Día 14						
Tratamiento	L*	a*	b*	C*	h	Visualización
T1	78.50 ± 0.45 ^a	-0.23 ± 0.02 ^c	2.21 ± 0.22 ^c	2.22 ± 0.22 ^c	1.68 ± 0.006 ^a	
T2	41.96 ± 0.18 ^b	36.32 ± 0.05 ^b	36.91 ± 0.44 ^a	51.78 ± 0.31 ^a	0.79 ± 0.008 ^b	
T3	23.70 ± 0.36 ^c	39.67 ± 0.07 ^a	20.77 ± 0.66 ^b	44.78 ± 0.29 ^b	0.48 ± 0.010 ^c	
CV	0.72	0.18	2.38	0.83	0.85	
P	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

Nota. Datos presentados como media ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas (P<0.05). %CV: Coeficiente de variación. D.E.: desviación estándar. L*: luminosidad (0 = negro, 100 = blanco). a*: cromaticidad verde-rojo (aprox. -60 = verde, +60 = rojo). b*: cromaticidad azul-amarillo (aprox. -60 = azul, +60 = amarillo). P: Probabilidad. C*: Croma. h: Ángulo de tono. T1: Tratamiento control (sin extracto). T2: Tratamiento 2 (0.14 mg/mL). T3: Tratamiento 3 (0.34 mg/mL).

Conclusiones

Se logró desarrollar películas a base de alcohol polivinílico (APV) incorporando extracto de remolacha en diferentes concentraciones (0, 0.14 y 0.34 mL/mg), obteniendo láminas homogéneas capaces de cambiar de color al variar el pH.

La adición de betacianinas incrementó el espesor y modificó las propiedades cromáticas de las películas, generando tonos más rojos e intensos (mayor valor a^* y croma) en comparación con el control. La propiedad mecánica de resistencia a la tensión no se vio afectada por la adición del extracto de remolacha.

Las películas demostraron ser capaces de cambiar de color en respuesta a fluctuaciones de pH, confirmando su potencial como material indicador para aplicaciones en empaques inteligentes para productos perecederos.

Recomendaciones

Realizar pruebas de contacto directo de las películas con alimentos reales para evaluar migración, estabilidad de color y desempeño como indicadores durante el almacenamiento.

Incluir en futuros estudios la evaluación de propiedades de barrera a gases (O_2 y CO_2) y de permeabilidad al vapor de agua a diferentes humedades relativas para definir aplicaciones específicas.

Optimizar la concentración de plastificante y de betacianinas para equilibrar flexibilidad, resistencia mecánica y estabilidad cromática.

Referencias

- Abdolmaleki, K., Rezaei, F., Mohammadi, R., Zare, L. y Shahmoradi, S. (2024). The application of film based on gelatin/hydroxymethyl cellulose and red beetroot betalain in smart food packaging. *Food Science and Technology International = Ciencia Y Tecnologia De Los Alimentos Internacional*, 10820132241266112. <https://doi.org/10.1177/10820132241266112>
- Abedi-Firoozjah, R., Parandi, E., Heydari, M., Kollahdouz-Nasiri, A., Bahraminejad, M., Mohammadi, R., Rouhi, M. y Garavand, F. (2023). Betalains as promising natural colorants in smart/active food packaging. *Food Chemistry*, 424, 136408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136408>
- Akhter, R., Masoodi, F. A., Wani, T. A. y Rather, S. A. (2019). Functional characterization of biopolymer based composite film: Incorporation of natural essential oils and antimicrobial agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137, 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.214>
- Akter, M., Islam, M. N., Yasmin, S. y Mahomud, M. S. (2024). Development of an intelligent packaging material incorporating betacyanin from red beetroot extract into polyvinyl alcohol films. *Future Foods*, 10, 100497. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100497>
- Amjadi, S., Almasi, H., Ghorbani, M. y Ramazani, S. (2020). Preparation and characterization of TiO₂NPs and betanin loaded zein/sodium alginate nanofibers. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100504. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100504>
- Cairone, F., Carradori, S., Locatelli, M., Casadei, M. A. y Cesa, S. (2020). Reflectance colorimetry: a mirror for food quality—a mini review. *European Food Research and Technology*, 246(2), 259–272. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03345-6>
- Cejudo-Bastante, M. J., Cejudo-Bastante, C., Cran, M. J., Heredia, F. J. y Bigger, S. W. (2020). Optical, structural, mechanical and thermal characterization of antioxidant ethylene vinyl alcohol copolymer films containing betalain-rich beetroot. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100502. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100502>
- Chaari, M., Elhadef, K., Akermi, S., Ben Akacha, B., Fourati, M., Chakchouk Mtibaa, A., Ennouri, M., Sarkar, T., Shariati, M. A., Rebezov, M., Abdelkafi, S., Mellouli, L. y Smaoui, S. (2022). Novel Active Food Packaging Films Based on Gelatin-Sodium Alginate Containing Beetroot Peel Extract. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/antiox11112095>
- Chew, Y. M., Hung, C.-H. y King, V. A.-E. (2019). Accelerated storage test of betalains extracted from the peel of pitaya (*Hylocereus cacti*) fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1595–1600. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03673-1>
- Drohsler, P., Cisar, J., Sopik, T., Sedlarik, V. y Pummerova, M. (2021). Effect of an Antioxidant Based on Red Beetroot Extract on the Abiotic Stability of Polylactide and Polycaprolactone. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(17). <https://doi.org/10.3390/molecules26175190>
- Flores-Mancha, M. A., Ruíz-Gutiérrez, M. G., Sánchez-Vega, R., Santellano-Estrada, E. y Chávez-Martínez, A. (2020). Characterization of Beet Root Extract (*Beta vulgaris*) Encapsulated with Maltodextrin and Inulin. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(23). <https://doi.org/10.3390/molecules25235498>

- Ghasempour, Z., Khodaeivandi, S., Ahangari, H., Hamishehkar, H., Amjadi, S., Moghaddas Kia, E. y Ehsani, A. (2022). Characterization and Optimization of Persian Gum/Whey Protein Bionanocomposite Films Containing Betanin Nanoliposomes for Food Packaging Utilization. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(7), 2800–2811. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02367-0>
- Gil-Martín, E., Forbes-Hernández, T., Romero, A., Cianciosi, D., Giampieri, F. y Battino, M. (2022). Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products. *Food Chemistry*, 378, 131918. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918>
- Hu, H., Yao, X., Qin, Y., Yong, H. y Liu, J [Jun] (2020). Development of multifunctional food packaging by incorporating betalains from vegetable amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) into quaternary ammonium chitosan/fish gelatin blend films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.103>
- Jamróz, E., Kulawik, P., Guzik, P. y Duda, I. (2019). The verification of intelligent properties of furcellaran films with plant extracts on the stored fresh Atlantic mackerel during storage at 2 °C. *Food Hydrocolloids*, 97, 105211. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105211>
- Kaba, E., Ozgen, S. y Sarioglu, K. (2020). Synthesis and characterisation of porous polyvinylpyrrolidone-co-poly(divinylbenzene) (PVP-co-PDVB) copolymer resins for the isolation of betalains from red beetroot. *Journal of Porous Materials*, 27(5), 1369–1376. <https://doi.org/10.1007/s10934-020-00912-1>
- Kan, J., Liu, J [Jing], Yong, H., Liu, Y., Qin, Y. y Liu, J [Jun] (2019). Development of active packaging based on chitosan-gelatin blend films functionalized with Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruit extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.155>
- Kanatt, S. R. (2020). Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100506>
- Kayın, N., Atalay, D., Türken Akçay, T. y Erge, H. S. (2019). Color stability and change in bioactive compounds of red beet juice concentrate stored at different temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 5097–5106. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03982-5>
- Kmilytha. (2011). *Elasticidad y elongación*. <http://kmilythabargxas.blogspot.com/2011/06/elasticidad-y-elongacion.html>
- Naghdi, S., Rezaei, M. y Abdollahi, M. (2021). A starch-based pH-sensing and ammonia detector film containing betacyanin of paperflower for application in intelligent packaging of fish. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.045>
- Otálora González, C. M., Schelegueda Pizones, L. I., Ruiz-Henestrosa, V. M., Campos, C. A., Basanta, M. F. y Gerschenson, L. N. (2022). *Cassava starch films with anthocyanins and betalains from agroindustrial by-products: their use for intelligent label development*. *Foods*. <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/21/3361>

- Priatni, S. y Pradita, A. (2015). Stability Study of Betacyanin Extract from Red Dragon Fruit (*Hylocereus Polyrhizus*) Peels. *Procedia Chemistry*, 16, 438–444. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.076>
- Qin, Y., Liu, Y., Zhang, X [Xin] y Liu, J [Jun] (2020). Development of active and intelligent packaging by incorporating betalains from red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel into starch/polyvinyl alcohol films. *Food Hydrocolloids*, 100, 105410. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105410>
- Qin, Y., Xu, F., Yuan, L., Hu, H., Yao, X. y Liu, J [Jun] (2020). Comparison of the physical and functional properties of starch/polyvinyl alcohol films containing anthocyanins and/or betacyanins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 898–909. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.065>
- Rahman, L. y Goswami, J. (2023). Poly(Vinyl Alcohol) as Sustainable and Eco-Friendly Packaging: A Review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41783-022-00146-3>
- Rodríguez-Félix, F., Corte-Tarazón, J. A., Rochín-Wong, S., Fernández-Quiroz, J. D., Garzón-García, A. M., Santos-Sauceda, I., Plascencia-Martínez, D. F., Chan-Chan, L. H., Vásquez-López, C., Barreras-Urbina, C. G., Olguin-Moreno, A. y Tapia-Hernández, J. A. (2022). Physicochemical, structural, mechanical and antioxidant properties of zein films incorporated with no-ultrafiltered and ultrafiltered betalains extract from the beetroot (*Beta vulgaris*) bagasse with potential application as active food packaging. *Journal of Food Engineering*, 334, 111153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111153>
- Singh, R., Kaur, J., Bansal, R., Sharanagat, V. S., Singh, L., Kumar, Y. y Patel, A. (2022). Development and characterization of elephant foot yam starch based pH-sensitive intelligent biodegradable packaging. *Journal of Food Process Engineering*, 45(3), Artículo e13984. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13984>
- Sohany, M., Tawakkal, I. S. M. A., Ariffin, S. H., Shah, N. N. A. K. y Yusof, Y. A. (2021). Characterization of Anthocyanin Associated Purple Sweet Potato Starch and Peel-Based pH Indicator Films. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/foods10092005>
- Spórna-Kucab, A., Kumorkiewicz, A., Szmyr, N., Szneler, E. y Wybraniec, S. (2019). Separation of betacyanins from flowers of *Amaranthus cruentus* L. In a polar solvent system by high-speed counter-current chromatography. *Journal of Separation Science*, 42(9), 1676–1685. <https://doi.org/10.1002/jssc.201801172>
- Wang, C.-Y. y Chang, F.-Y. (2022). The influence of packaging color on taste expectations and perceptions. *Color Research & Application*, 47(6), 1426–1441. <https://doi.org/10.1002/col.22812>
- Wei, Q., Wang, Y., Che, Y., Yang, M., Li, X. y Zhang, Y. (2017). *Molecular mechanisms in compatibility and mechanical properties of Polyacrylamide/Polyvinyl alcohol blends* (65, 565–573). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27718455/>
- Wu, Y., Tang, P., Quan, S., Zhang, H., Wang, K. y Liu, J [Jun] (2021). Preparation, characterization and application of smart packaging films based on locust bean gum/polyvinyl alcohol blend and

- betacyanins from cockscomb (*Celosia cristata* L.) flower. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.113>
- Yao, X., Hu, H., Qin, Y. y Liu, J [Jun] (2020). Development of antioxidant, antimicrobial and ammonia-sensitive films based on quaternary ammonium chitosan, polyvinyl alcohol and betalains-rich cactus pears (*Opuntia ficus-indica*) extract. *Food Hydrocolloids*, 106, 105896. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105896>
- Yao, X., Qin, Y., Zhang, M., Zhang, J., Qian, C. y Liu, J [Jun] (2021). Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.152>
- Zhang, X [X], Li, Y., Guo, M., Jin, T. Z., Arabi, S. A., He, Q. y Liu, D. (2021). *Antimicrobial and UV blocking properties of composite chitosan films with curcumin grafted cellulose nanofiber*. *Food Hydrocolloids*.
- Zin, M. M., Borda, F., Márki, E. y Bánvölgyi, S. (2021). Betalains, total polyphenols, and antioxidant contents in red beetroot peel (*Cylindra* type). *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 16(S2), 27–36. <https://doi.org/10.1556/446.2020.20004>

Anexos

Anexo A

Tratamiento 1 (Control)



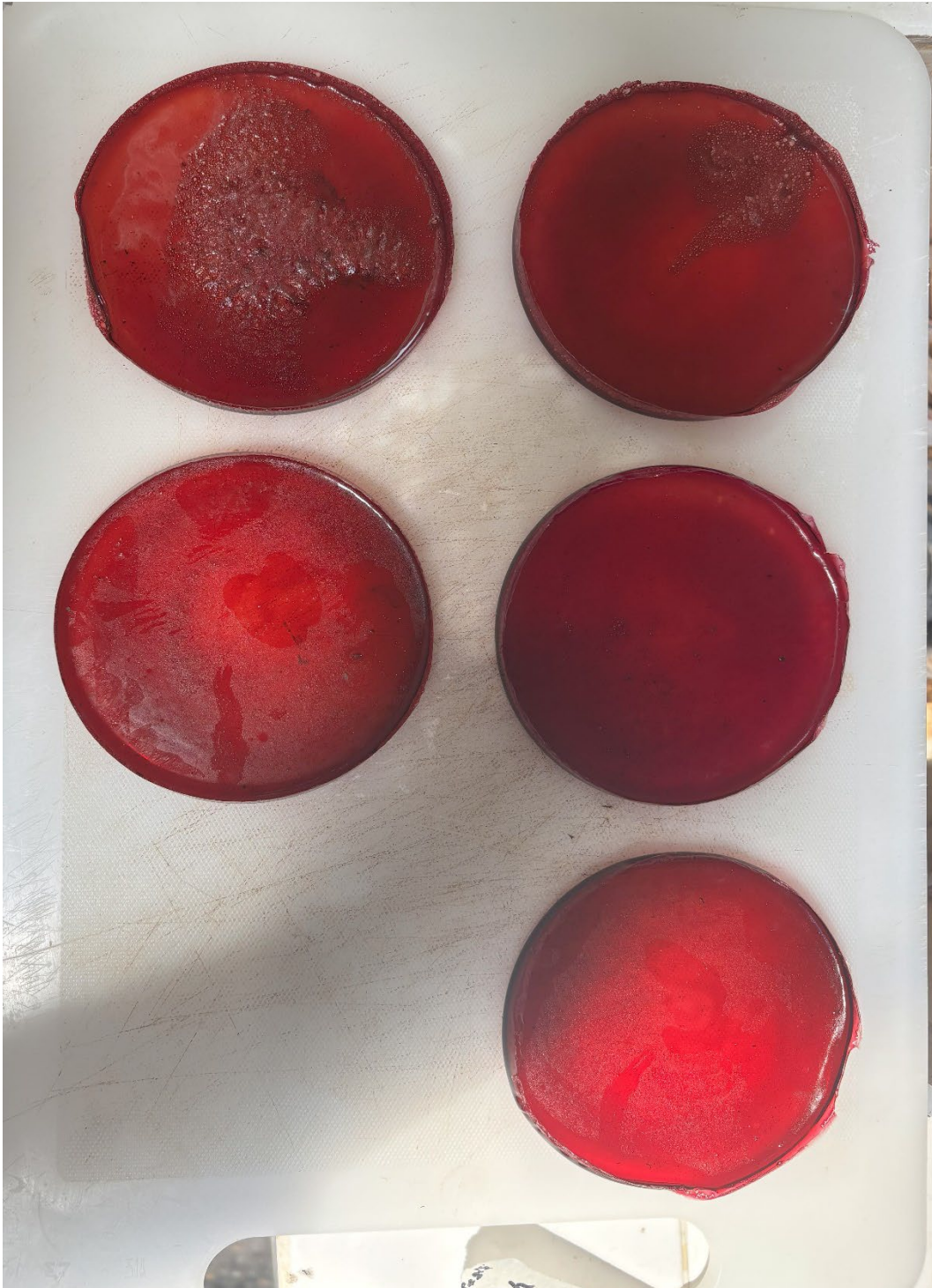
Anexo B

Tratamiento 2 (con 0.14 mg/mL de extracto de betacianinas)



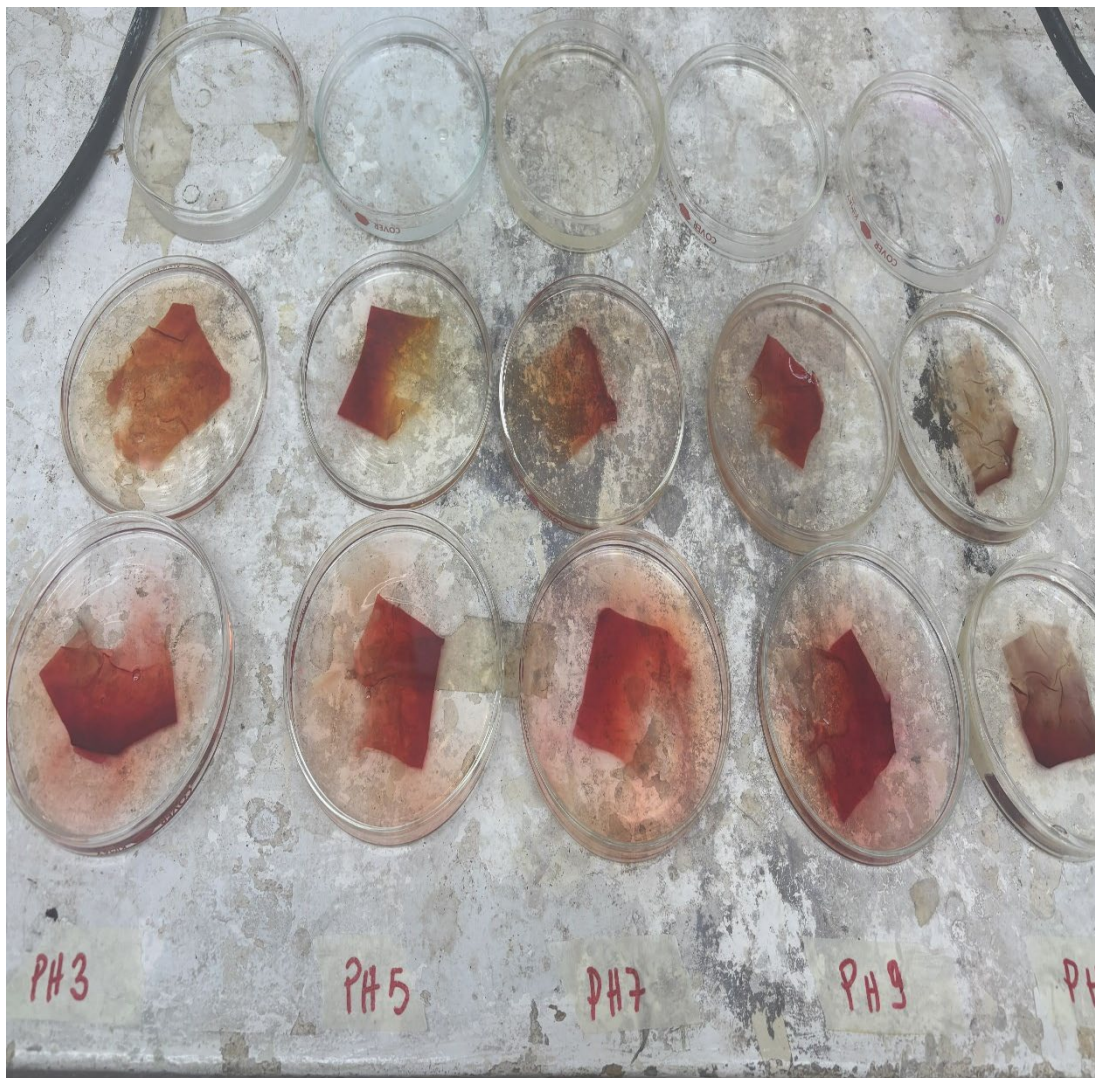
Anexo C

Tratamiento 3 (con 0.34 mg/mL de extracto de betacianinas)



Anexo D

Prueba de sensibilidad al pH



Anexo E

Medición del Espesor

