



PRODUCCIÓN DE BIOPELÍCULAS A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE CAFÉ CON
POTENCIAL APLICACIÓN EN EMPAQUES

JULIAN TORRES FIGUEROA

Proyecto de grado

Asesor

Catalina Giraldo Estrada

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2025

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco profundamente a mi familia quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y me han ayudado a alcanzar todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. A mi compañera de vida, Nicolle, por inspirarme, ayudarme y motivarme continuamente para concretar este proyecto con la excelencia que el mismo se merece.

Extiendo un especial agradecimiento a los técnicos de laboratorio Sigifredo, Edgar, Ana y Mauricio, cuyo acompañamiento constante fue clave para superar los retos técnicos y prácticos que surgieron a lo largo de la investigación. Su disposición, paciencia y conocimiento, siempre ofrecidos con generosidad y mucho profesionalismo, hicieron posible la correcta ejecución del trabajo experimental.

Asimismo, agradezco profundamente a mi asesora Catalina Giraldo Estrada, por guiarme continuamente en cada una de las etapas de la investigación, también por brindarme las herramientas para ejecutar todas las tareas asociadas al proyecto de forma debida y por ayudarme constantemente con sus observaciones precisas. Su gran profesionalismo y vocación en temas relacionados con la sostenibilidad me motivaron constantemente a dar lo mejor de mí en cada etapa del proyecto, impulsándome a desarrollar un trabajo con compromiso y excelencia. También quiero reconocer la dedicación de mis profesores, quienes con su enseñanza y exigencia me brindaron las herramientas necesarias para crecer como estudiante y como persona.

Finalmente, quiero expresar un agradecimiento muy especial a la Universidad EAFIT y a la ANDI, instituciones que no solo me brindaron la oportunidad de formarme académicamente, sino que transformaron profundamente mi vida. Gracias a esta alianza, pude acceder a una educación fundamentada en la excelencia, rodeado de personas y espacios que despertaron en mí nuevas aspiraciones, ampliaron mi visión del mundo y me permitieron creer en un futuro distinto. Gracias a ello, llevo en mí la impronta eafitense y como profesional siempre buscaré inspirar, crear y transformar.

Resumen

La industria del café genera enormes volúmenes de biomasa residual, lo cual representa un desafío ambiental y, a su vez, una oportunidad para la obtención de biopolímeros. Este estudio propone valorizar la pulpa de café mediante la producción de biopelículas de pectina con potencial aplicación en empaques. Se extrajo pectina de pulpa de *Coffea arabica* (variedad Caturra Chiraso) utilizando H_2SO_4 0.1 M, evaluando el efecto de temperatura (25–100 °C) y tiempo (30–90 min) en el rendimiento de extracción. Las mejores condiciones fueron 100 °C y 90 min, alcanzando un rendimiento del $6.95 \pm 0.78\%$. La pectina obtenida presentó un grado de esterificación del $59 \pm 3.1\%$ y grado de metoxilación de $5.2 \pm 0.4\%$. Las biopelículas se produjeron mediante *solvent casting*, variando concentraciones de pectina (2–5%) y sorbitol como plastificante (20–40%) y evaluando como respuesta las propiedades mecánicas resultantes. Para la mejor formulación evaluada (5% pectina y 40% sorbitol) se encontró una resistencia a la tracción de 2.28 ± 0.33 MPa y un porcentaje de elongación de $22.75 \pm 3.29\%$. Las películas obtenidas exhibieron actividad antioxidante (eliminación de radicales ABTS: $17.7 \pm 2.2\%$) y permeabilidad al vapor de agua ($5.44 \pm 0.27 \times 10^{-10}$ kg/ m s Pa) comparable a la de otros biopolímeros similares. Además, la microscopía electrónica reveló estructuras homogéneas sin cavidades, indicando compatibilidad entre componentes. En relación con los resultados, se demostró el potencial de la pulpa de café como fuente de pectina para la producción de biopelículas. Sin embargo, considerando su potencial en empaques, se sugiere profundizar en la investigación para mejorar las propiedades mecánicas y funcionales mediante la incorporación de nanomateriales o la combinación con otros biopolímeros, ya que esto podría permitir el desarrollo de un bioplástico competitivo en su desempeño funcional, lo que facilitaría su implementación en reemplazo de plásticos convencionales.

1. Introducción

El café es una de las bebidas no alcohólicas más consumidas a lo largo del mundo, cuyo consumo ha aumentado a través de los años beneficiando a los países productores quienes están ubicados especialmente en Sudamérica y, a pesar de que ha tenido lugar un déficit de 4.4 millones de sacos a nivel mundial durante 2023 por el bajo crecimiento de la producción a raíz de los altos precios de los insumos y a condiciones climáticas desfavorables, el consumo mundial para ese mismo año fue de 170.22 millones de sacos que representa un 0.23% más que el año inmediatamente anterior [1], [2]. Dentro de los países sudamericanos, Colombia destaca siendo un país reconocido internacionalmente por su producción de café que se categoriza como el segundo productor más grande de la región con una producción de 13.476 millones de sacos en 2024, ubicándose después de Brasil que tuvo una producción de 59 millones de sacos en el mismo periodo [3], [4]. Colombia, a pesar de categorizarse a nivel productivo como un país de volatilidad con tendencia a la estabilidad, ha experimentado un crecimiento general entre 2015 y 2024, manteniendo una producción promedio de 12.4 millones de sacos y experimentando un récord histórico de exportaciones entre enero y octubre de 2022 con \$3.748 millones de USD facturados [5], [6]. No obstante, pese a que el crecimiento en la producción de café ha beneficiado históricamente al país, la producción y la creciente exportación de café ha supuesto el surgimiento de problemáticas asociadas con el manejo de residuos que se estiman que corresponden a alrededor de 650 kg por cada 1000 kg de café consumidos y que, en virtud de que el 80% de la producción es destinada al comercio internacional, deben ser tratados en el país de origen [7], [8]. En lo que respecta a esta coyuntura, se han desarrollado múltiples estrategias para el manejo de subproductos y residuos de café, donde las aplicaciones que más destacan son la generación de nuevos materiales y también su uso como combustible; ambas estrategias con una fuerte inclinación hacia el reemplazo de derivados del petróleo [9], [10].

En relación con la generación de nuevos materiales, destaca el escenario de los polímeros y sus aplicaciones, donde los más comunes son derivados del petróleo que por su naturaleza no son biodegradables y, a raíz de que no suelen ser recuperados después de su uso, los largos volúmenes producidos podrían terminar en los suelos reduciendo progresivamente la permeabilidad al gas y al agua, alterando la estabilidad del sistema y de la microbiota existente y dando lugar a la posibilidad de que estos puedan entrar finalmente en la cadena alimenticia [9]. Está problemática, en relación con el aumento en la cantidad de residuos producidos en la industria de café, ha incentivado la necesidad de desarrollar estrategias para valorizar la biomasa residual a través de la producción de biopolímeros donde, para tal fin, se ha estudiado el uso de cáscara de café, mucilago de café, pulpa de café, piel plateada de café y pozos residuales de café, entre otros residuos provenientes de este desecho agroindustrial [11]. La pulpa de café, que es precisamente el subproducto más abundante representando alrededor del 40% del grano de café, está compuesta principalmente de carbohidratos incluyendo pectina (20 –

30%), oligosacáridos y fibra (30%) y proteínas, minerales y agua [12], [13], aunque también se ha encontrado que es una fuente rica en compuestos fenólicos (entre 1.80 – 8.56%) tales como el ácido clorogénico, el ácido cafeico y el ácido ferúlico, por lo que se considera una fuente natural de antioxidantes [14], [15]. Según la literatura, se ha estimado que se puede extraer alrededor de 49.8 g de pectina a partir de 1 kg de pulpa de café, lo que resulta interesante en virtud de que la pectina posee diversas propiedades que le permiten actuar como agente emulsificante, estabilizador y formador de geles [16], [17]. A raíz de estas propiedades, la pectina se destaca como un polímero adecuado para el desarrollo de biopelículas con especial énfasis en empaques de alimentos [18].

En este ámbito, con énfasis en el contexto de los polímeros biodegradables y dado que los desechos de actividades de agricultura constituyen las principales fuentes de obtención de pectina [19], la pulpa de café resulta interesante para la extracción de pectina con hincapié en la producción de películas para su uso potencial en empaques. En la literatura se ha investigado la producción de biopelículas de pectina a partir de residuos de diferentes orígenes tales como cáscara de mandarina (*citrus unshiu*) [20], mesocarpio de pequí (*caryocar brasiliense*) [21], cáscaras de cítricos [22], cáscara de pomelo rojo [23], entre otras, donde se ha encontrado que en la extracción de pectina influye significativamente el origen del residuo agroindustrial y el proceso de extracción utilizado (método, pH, temperatura, tiempo) precisamente porque esto modula las propiedades finales de la pectina, especialmente el grado de esterificación (% DE) que determina si esta es de alto grado de metoxilación (HMP) o de bajo grado (LMP) lo que influye en su capacidad para gelificar y formar películas [12]. En línea con esto, es de destacar que la resistencia a la tracción (RT) en las películas producidas a partir de residuos agroindustriales suele ser baja o moderada (9 ± 6 MPa) mientras que su porcentaje de elongación (% E) moderado ($12 \pm 4\%$), cuyos valores varían según el método de preparación de las películas (siendo el más común *solvent casting*) y también del uso de agentes plastificantes (como glicerol, sorbitol, PEG y agua) y dispersantes (Tween 20) [24], [25]. En este sentido, dada la importancia del origen y las condiciones de extracción de pectina en sus propiedades finales (% DE principalmente), además de la influencia que tiene el método de preparación de las películas en las propiedades mecánicas resultantes, se propone estudiar la producción de películas de pectina a partir de residuos agroindustriales de pulpa de café para validar su potencial aplicación en empaques.

2. Materiales y métodos

2.1. Preparación de la pulpa de café

La pulpa de café de la especie *Coffea Arabica* (variedad de Caturra Chiroso) fue obtenida de una finca cafetera ubicada en Urrao – Antioquia ($6^{\circ}13'24.2''N$ $76^{\circ}08'16.7''W$). Esta se despulpó de manera mecánica, se almacenó a $4^{\circ}C$ con el propósito de conservarla y posteriormente se secó sobre una superficie ventilada a temperatura ambiente durante 24 h. La pulpa se secó una vez más en un horno (OF -02GW Forced Convection Oven 60L) a $50^{\circ}C$ durante 24 horas para retirar la humedad residual, subsecuentemente se molió en ayuda de una licuadora (Oster BLST4655) hasta malla # 50 ($300 \mu m$) y se almacenó en bolsas zip de polietileno a temperatura ambiente ($25^{\circ}C$).

Con el objetivo de determinar el contenido de materia seca y humedad en la pulpa fresca de café (variedad Caturra Chiroso) se consideró la metodología reportada por [26] con leves modificaciones. Para tal propósito, se secó por triplicado una porción representativa (100 ± 0.1 g) de pulpa de café en un horno (OF -02GW Forced Convection Oven 60L) a $105 \pm 0.1^{\circ}C$ hasta que su peso fue constante. La cantidad de materia seca se determinó pesando la muestra y el % de humedad se determinó a partir de la ecuación (1).

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Masa inicial (g)} - \text{Cantidad de materia seca (g)}}{\text{Masa inicial (g)}} \quad (1)$$

2.2. Extracción de pectina a partir de pulpa de café

La extracción de pectina a partir de la pulpa de café previamente tratada se llevó a cabo con énfasis en la metodología de [27] y [28] con ligeras modificaciones (Figura 1). Se realizó una extracción en medio ácido con

H_2SO_4 0.1 M (Merck, U.S) a partir de diferentes condiciones de operación en donde se conservó una relación sólido - líquido de 1:5 (p/v), un pH de 2.0 y un tamaño de partícula $\leq 300 \mu m$, mientras se varió la temperatura de extracción entre 25 °C, 50 °C y 100 °C y el tiempo de extracción entre 30, 60 y 90 min (Figura 2). La suspensión resultante de la extracción se centrifugó (Hettich ROTINA 420R) durante 20 min a 4500 RPM y 25 °C para luego recuperar el líquido sobrenadante el cual se mezcló con etanol 96% (v/v) en relación 1:1 (v/v) a 4 °C durante 16 h con el propósito de precipitar la pectina previamente hidrolizada. Posteriormente, se centrifugó (OF -02GW Forced Convection Oven 60L) la mezcla resultante durante 20 min a 4500 RPM y 4 °C, se recuperó el sólido precipitado el cual se lavó 3 veces con 100 mL de etanol 96%, se secó en un horno (OF -02GW Forced Convection Oven 60L) a 35 °C hasta alcanzar el equilibrio y finalmente se molió (Oster BLST4655) hasta conseguir un tamaño de partícula menor a 2 mm.

Figura 1. Proceso de extracción de pectina a partir de pulpa de café

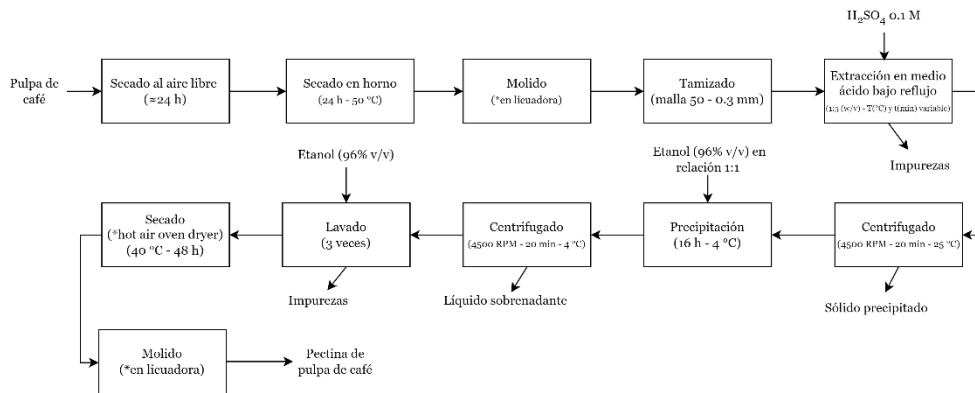
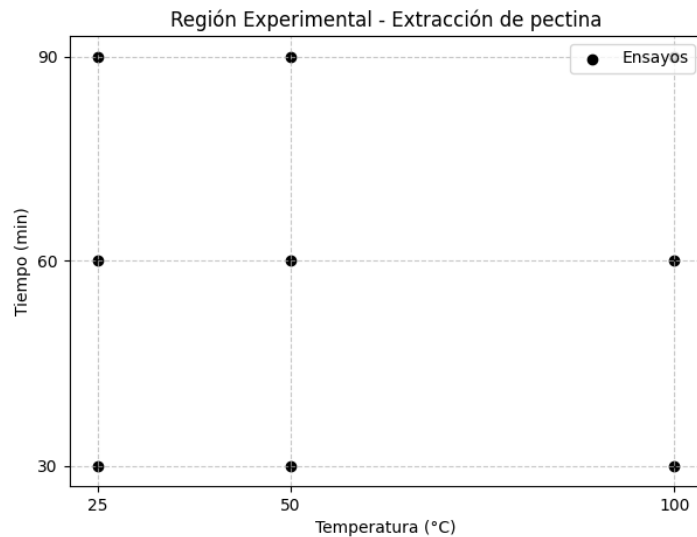


Figura 2. Diseño de experimentos para evaluar la extracción de pectina respecto al rendimiento de extracción



Con el objetivo de determinar las mejores condiciones de operación (Figura 2) durante la extracción en medio ácido (H_2SO_4 0.1 M) se consideró el rendimiento de extracción a partir de la ecuación reportada por [12] (Ecuación (2)).

$$\text{Rendimiento pectina (\%)} = \frac{\text{Peso de la pectina seca (g)}}{\text{Peso pulpa seca usada en extracción (g)}} \times 100 \quad (2)$$

Se realizó un diseño de experimentos factorial 3^2 para evaluar la respuesta de los factores tiempo (min) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en términos del rendimiento de extracción de pectina (Ecuación (2)) y con el propósito de darle robustez a los resultados obtenidos todos los experimentos descritos se llevaron a cabo por triplicado.

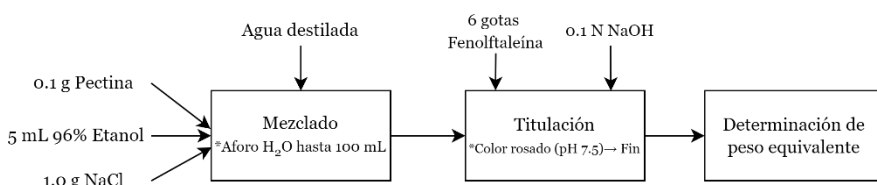
2.3. Caracterización de la pectina extraída de pulpa de café

Después de determinar cuáles condiciones de extracción de pectina supusieron el mayor rendimiento de extracción, se caracterizó la pectina obtenida para estas condiciones respecto a su peso equivalente, grado de metoxilación (% R – OCH_3), grado de esterificación (% DE) y contenido de ácidos anhidrorrónicos (% AUA).

2.3.1. Peso equivalente

El ensayo de peso equivalente que permite determinar el contenido total de ácidos galacturónicos libres, es decir, aquellos que no están esterificados, en las cadenas moleculares que componen la pectina se realizó según lo reportado por [29]. El procedimiento realizado se encuentra sintetizado en la Figura 3.

Figura 3. Procedimiento para determinar el peso equivalente de pectina



Para este se tomaron 0.1 g de pectina de pulpa de café que fueron mezclados con 5 mL de etanol 96% (v/v) y 1 g de NaCl (Merck, U. S.) que luego se aforaron con agua destilada hasta completar 100 mL. Se adicionaron 6 gotas de fenolftaleína y posteriormente se tituló con NaOH 0.1 N hasta un cambio de coloración ligeramente rosa que indicó el punto final de la titulación. El peso equivalente se halló mediante la siguiente ecuación:

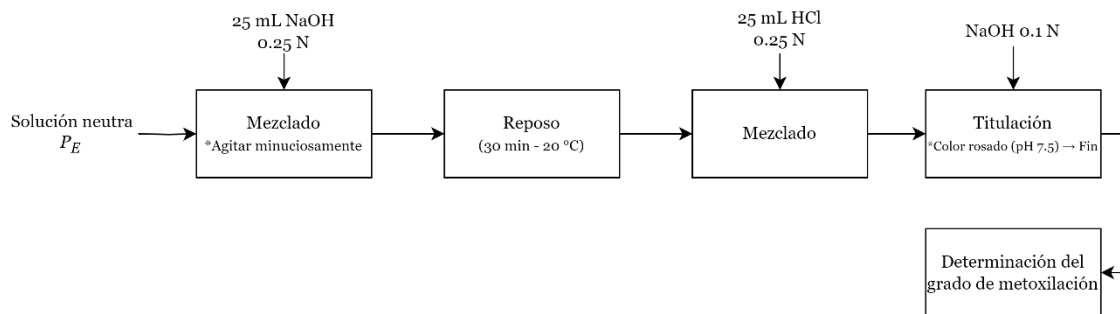
$$P_E = \frac{W_1}{V \times N} \times 1000 \quad (3)$$

Donde P_E es el peso equivalente de la pectina en (g/mol), W_1 es el peso de la muestra de pectina (g), V_i es el volumen de NaOH utilizado (mL) y N es la normalidad de la solución de NaOH empleada.

2.3.2. Grado de metoxilación (% R – OCH_3)

El grado de metoxilación es un método importante en el control del tiempo de gelificación de la pectina, su sensibilidad a cationes polivalentes y en general para determinar su utilidad para la formación de geles, películas y fibras con bajo contenido de sólidos. Este ensayo se realizó bajo los parámetros reportados por [30] y la metodología seguida se encuentra resumida en la Figura 4.

Figura 4. Determinación del grado de metoxilación de pectina



Para ello se tomó la solución neutral resultante de la titulación que se llevó a cabo en la determinación del peso equivalente, se le agregó 25 mL de NaOH 0.25 N en agitación y se dejó reposando la solución resultante por 30 min a 20° C. Posteriormente se agregó 25 mL de HCl 0.25 N, se tituló con NaOH 0.1 N hasta que la solución adquirió una coloración ligeramente rosada y finalmente se calculó el grado de metoxilación con la ecuación (4).

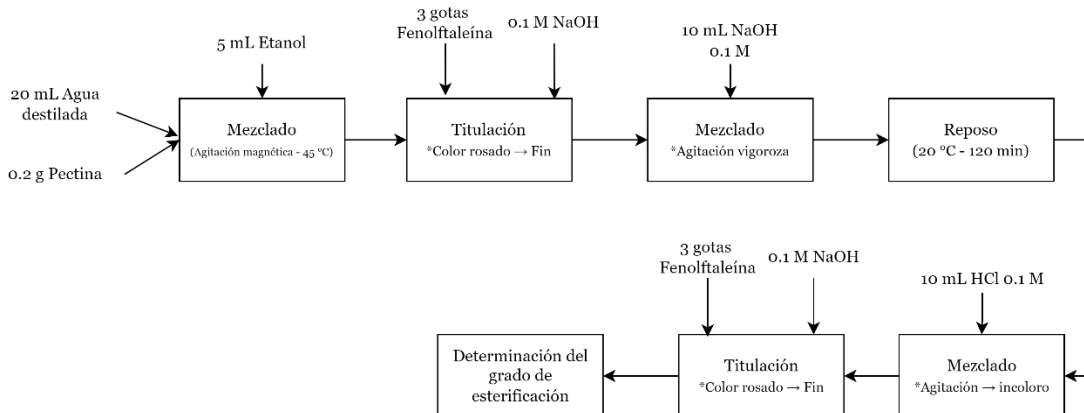
$$\text{MeO (\%)} = \frac{(V_i \times M) \times 3.1}{W_i} \quad (4)$$

Donde MeO es el grado de metoxilación en (%), V_i es el volumen de NaOH utilizado (mL), M es la molaridad de la solución de NaOH empleada (mol/L) y W_i es el peso de la muestra de pectina empleada (g).

2.3.3. Grado de esterificación (% DE)

El grado de esterificación se realizó a partir del método desarrollado por [31] (Figura 5), para lo cual se disolvieron 0.2 g de pectina extraída de pulpa de café en 5 mL de etanol 96 % (v/v) y 20 mL de agua destilada con ayuda de un agitador magnético a 45 °C. Subsecuentemente se agregaron 3 gotas de fenolftaleína y se tituló con NaOH 0.1 M hasta que la solución viró ligeramente a color rosa. Posteriormente se adicionó a la solución 10 mL de NaOH 0.1 M, se agitó vigorosamente para asegurar la neutralización de los ácidos poligalacturónicos presentes en la pectina y se reposó la solución a 20 °C durante 2 horas. Una vez transcurrido este tiempo se agregaron 10 mL de HCl 0.1 M hasta que el color rosa presente en la solución desapareciera, se adicionaron 3 gotas de fenolftaleína y finalmente se tituló con NaOH 0.1 M hasta que se observó nuevamente el color rosado en la solución. El grado de esterificación se calculó en ayuda de la ecuación (5).

Figura 5. Determinación del grado de esterificación de pectina



$$DE(\%) = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \times 100 \quad (5)$$

En esta ecuación V_1 es el volumen de NaOH (mL) utilizado en la primera titulación, mientras que V_2 (mL) es el volumen usado en la segunda titulación.

2.3.4. Contenido de ácidos anhidrouónicos (AUA)

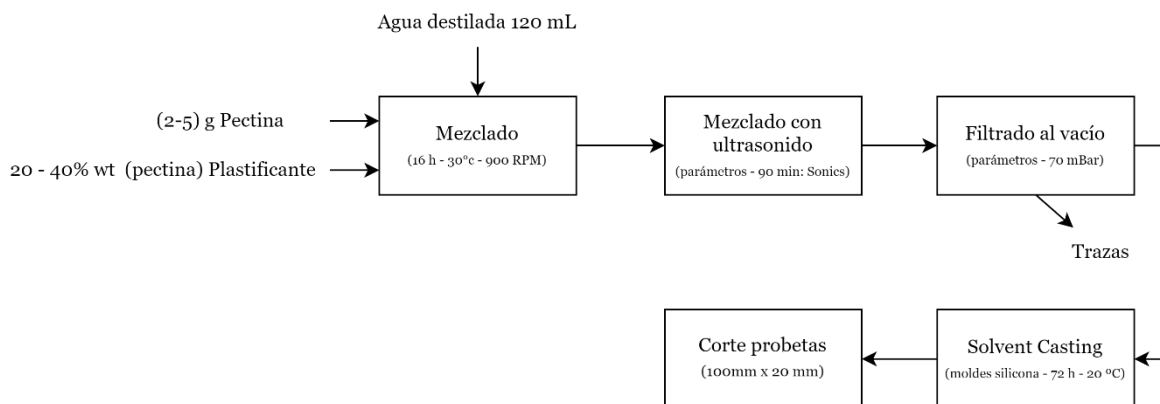
El contenido de ácido anhidrouónicos se calculó a partir del método reportado por [32] a partir de la ecuación (6).

$$AUA (\%) = \frac{(176 \times MeO)}{DE \times 31} \times 100 \quad (6)$$

2.4. Preparación de biopelículas de pectina a partir de biomasa residual de café

La preparación de películas de pectina se realizó a partir de la metodología propuesta por [22] con modificaciones implementadas en virtud de que se estudió el efecto de diferentes proporciones de pectina y plastificante en las propiedades mecánicas resultantes de películas de pectina (Figura 6). Puntualmente se produjeron las películas mediante el método de “*Solvent casting*” en donde diferentes proporciones de pectina (2 – 5 %) y plastificante (20 – 40 % en relación con la pectina) se adicionaron a 100 mL de agua destilada para posteriormente agitar de manera constante (900 RPM) la solución resultante a una temperatura de 30 °C durante 16 h (CORNING PC-420D). Subsecuentemente se llevó la solución a un equipo de ultrasonido (BRANDSON 5210 R-DTH) durante 90 min con el propósito de acelerar el proceso de disolución de pectina y mitigar la formación de burbujas en la solución y finalmente se filtró al vacío (ME 2C NT a 70 mbar). La solución resultante se llevó a moldes de silicona, específicamente en una proporción de 60 mL en un área de 200 cm² para posteriormente dejarla secando a 20 °C durante 72 h hasta que se formó la película y esta se retiró del molde.

Figura 6. Preparación de películas de pectina

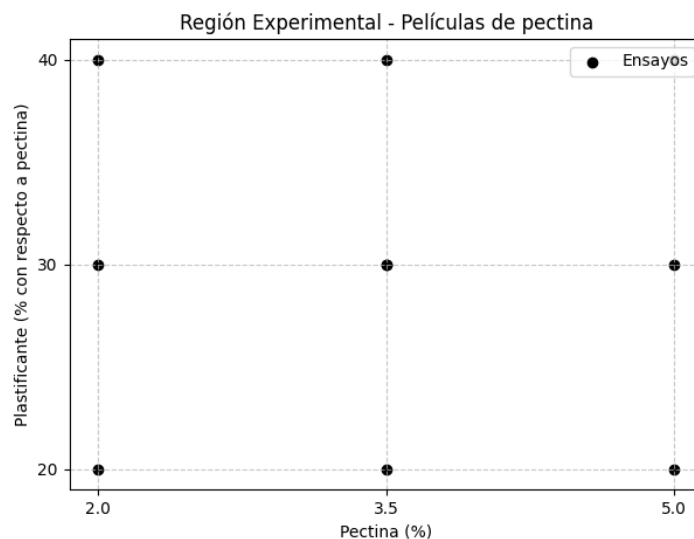


Con el propósito de evaluar el efecto de diferentes proporciones de pectina y plastificante en las propiedades mecánicas resultantes de las películas (resistencia a la tracción y % de elongación) se realizó un diseño de experimentos factorial con puntos centrales (Figura 7). La región experimental para la preparación de películas de pectina se definió con énfasis en los valores reportados por [23], [33], [34], [35], [36], [37] [38], aunque, de manera preliminar con el objetivo de definir el plastificante a usar se realizaron ensayos con los valores medios (3.5 % (p/p) de pectina y 30 % en relación con la pectina de plastificante) a partir de glicerol (Protokimica, Colombia), sorbitol (Protokimica, Colombia) y polietilenglicol (PEG - $m_n \sim 5800$ en promedio, Sigma – Aldrich, U.S) para evaluar su respuesta, cribar los resultados y así determinar el más apropiado para el diseño de experimentos descrito. Dichos ensayos preliminares, se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Ensayos preliminares con películas de pectina para determinar el plastificante a emplear

Plastificante	(%) Pectina	(% con respecto a pectina) Plastificante
Glicerol	3.5	30
Sorbitol	3.5	30
PEG	3.5	30

Figura 7. Región experimental del diseño de experimentos de películas de pectina



2.4.1. Propiedades mecánicas

La resistencia a la tracción (RT) y el porcentaje de elongación en el fallo (%E) se determinó en el marco de la norma ASTM D882-18 [39]. Se utilizó una máquina universal (INSTRON 5900) a una temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa de $50 \pm 5\%$ con una tasa de deformación de 5 mm/s. Para ensayar las diferentes películas preparadas, se cortaron probetas de 100 mm × 50 mm a las cuales se les estimó su grosor en ayuda de un micrómetro digital (INSIZE, $0 - 25 \pm 0.01$ mm) realizando mediciones en 10 puntos aleatorios de la probeta y se expresó el grosor en mm a partir del valor promedio calculado [40].

La resistencia a la tracción se halló en ayuda de la ecuación (7), mientras que el porcentaje de elongación se calculó mediante la ecuación (8).

$$RT \text{ (MPa)} = \frac{F_m}{L \times g} \quad (7)$$

En esta ecuación RT (MPa) hace referencia a la resistencia a la tracción, mientras que F_m (N) hace referencia a la fuerza máxima que experimentó la probeta durante el ensayo de tracción, L (mm) al ancho de la probeta y g (mm) al grosor medido.

$$E \text{ (\%)} = \frac{E_2}{E_1} \times 100 \quad (8)$$

Donde E (%) es el porcentaje de elongación en el fallo durante el ensayo de tracción, E_1 (mm) es la longitud inicial de la probeta y E_2 (mm) es la longitud después de realizar el ensayo de tracción.

2.5. Caracterización de las biopelículas de pectina

Después de determinar cuál plastificante y qué proporciones de pectina y plastificante supusieron la mejor respuesta en términos de las propiedades mecánicas conseguidas en las películas producidas (RT y % E), se caracterizaron las películas obtenidas para estas condiciones respecto a su opacidad, morfología superficial y transversal, permeabilidad al vapor de agua y capacidad antioxidante.

2.5.1. Opacidad y resistencia a los rayos UV

La opacidad de las películas de pectina trabajadas se determinó a partir de la medición de la absorbancia a 600 nm de segmentos rectangulares (1cm × 2 cm) de la película seleccionada a partir del método descrito por [41]. Se empleó una celda como blanco y se midió la absorbancia de los segmentos rectangulares descritos en un espectrofotómetro de UV-Visible (Thermo Scientific GENESYS 10S UV-Vis). Se determinó la opacidad de las películas a partir de siguiente ecuación:

$$\text{Opacidad} = \frac{\text{Abs}}{g} \quad (9)$$

Donde Abs es el valor medido de la absorbancia a 600 nm y g es el grosor de la película (mm).

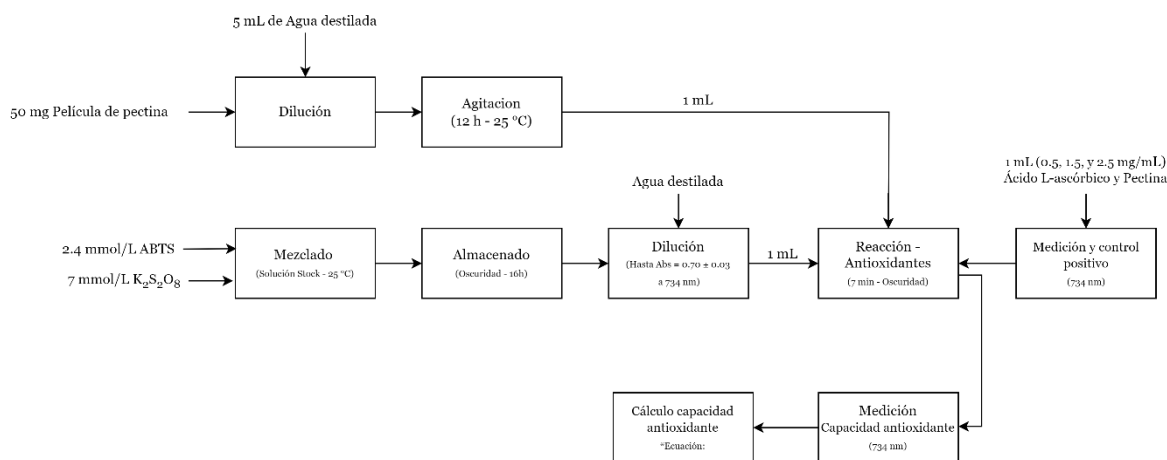
Adicionalmente se evaluó la resistencia a los rayos UV de las películas resultantes a partir de la medición de la transmitancia a longitudes de onda entre 200 y 800 nm [41].

2.5.2. Actividad antioxidante

2.5.2.1. Ensayo de eliminación de radicales ABTS

La actividad antioxidante para las películas de pectina se determinó a partir de la capacidad de eliminación de radicales ABTS según lo reportado por [41] (Figura 8). Para esto fue necesario preparar una solución stock de ABTS a partir de 2.4 mmol/L de sal ABTS (Sigma – Aldrich, U.S) y 7 mmol/L de persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$ – Merck, U.S) que se mezclaron en una proporción 1:1, reaccionaron a temperatura ambiente y se mantuvieron durante 16 h en ausencia de luz. A razón de que la pectina se precipita en alcohol incluso en pequeñas cantidades y esto podría afectar los resultados finales de la actividad antioxidante, se eligió agua destilada como diluyente en reemplazo de metanol, por lo que la solución stock de ABTS se diluyó en agua desionizada hasta una absorbancia de 0.700 ± 0.03 a 734 nm que se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific GENESYS 10S UV-Vis). Con el objetivo de verificar la actividad antioxidante de la pectina, se tomó 1 mL de solución del polisacárido a diferentes concentraciones (0.5, 1.5 y 2.5 mg/mL) y se mezcló con 1 mL de la solución diluida de ABTS, dejándolas reaccionar durante 7 minutos en oscuridad para después medir la absorbancia de la solución resultante a 734 nm. El control positivo se realizó a partir de ácido L-ascórbico (vitamina C – Merck, U.S) a las mismas concentraciones trabajadas para la pectina.

Figura 8. Medición de capacidad antioxidante a partir de ABTS



Adicionalmente, con el propósito de evaluar la actividad antioxidante de las películas resultantes, se realizó una solución de extracto de película de pectina para lo cual se mezcló 50 mg de las películas seleccionadas con 5 mL de agua desionizada y se agitó a 140 RPM (New Brunswick Scientific Excella E24) a 25 °C durante 12 h para luego mezclar el sobrenadante con 1 mL de la solución diluida de ABTS, dejándolo reaccionar en oscuridad durante 7 min y finalmente midiendo la absorbancia a 734 nm [42].

$$\text{Actividad antioxidante frente a radicales ABTS (\%)} = \left(\frac{A_1 - A_s}{A_1} \right) \times 100 \quad (10)$$

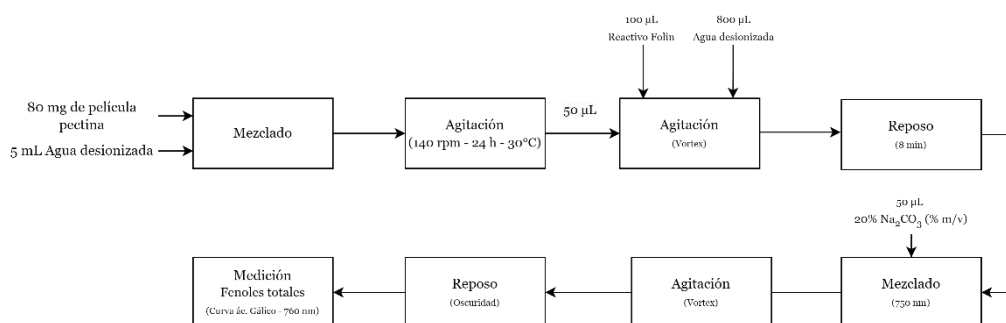
La capacidad de captura del radical de ABTS se calculó mediante la ecuación (10) en donde A_1 es la absorbancia del blanco (agua desionizada en lugar de la muestra), mientras que A_s es la absorbancia de la muestra.

2.5.2.2. Fenoles totales

Se reportó la cantidad de fenoles totales presentes en las películas seleccionadas mediante método colorimétrico a partir de lo descrito por [43] y [44] (Figura 9). En primer lugar, se prepararon las soluciones de

extracto de las películas obtenidas mezclando 80 mg de la película de pectina con 5 mL de agua desionizada, para luego colocar la solución resultante en un agitador (New Brunswick Scientific Excella E24) a 140 RPM y 30 °C durante 24 h. Posteriormente, se tomó una alícuota de 50 µL del sobrenadante de la solución, 800 µL de agua desionizada y 100 µL del reactivo de Folin Ciocalteu (Panreac AppliChem, España), que se agitó en vortex (Corning LSE6775, U. S.) y se dejó en reposo por 8 minutos. Luego se adicionaron 50 µL de Na₂CO₃ al 20 (% m/v) (Panreac AppliChem, España) y se agitó nuevamente en vortex. Transcurrida 1 hora en la oscuridad se leyó la absorbancia a 760 nm usando un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific GENESYS 10S UV-Vis). Se usaron soluciones de ácido gálico (Merck, U. S.) para construir la curva de calibración (5-200 mg/mL de ácido gálico, r² = 0.9938). Los resultados se expresan como mg equivalentes de ácido gálico (GAE)/g de la película.

Figura 9. Cuantificación de fenoles totales en películas de pectina



2.5.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología de la estructura superficial y transversal de las películas producidas se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM o *scanning electron microscope*) con un equipo Zeiss Evo 10. El rango de operación se definió entre 15 – 20 kV y a raíz de la naturaleza no conductora de las películas de estas se fijaron mediante cinta de carbono y se recubrieron con una aleación de Au – Pd con un espesor de 12 nm en presencia de gas de Argón.

2.5.4. Permeabilidad al vapor de agua (WVP)

La evaluación de la permeabilidad al vapor de las películas de pectina se realizó con énfasis en la norma E96M – 24a [45] a partir del método del disecante. Se prepararon recipientes con 2 g de cloruro de calcio anhidro (CaCl₂ – Merck, U.S) para crear dentro de ellos condiciones de 0% de humedad. La cara superior de los recipientes (abierta) se cubrió con las películas y adicionalmente, para garantizar su fijación, los bordes del recipiente se sellaron con una película de polietileno linear de baja densidad (papel film). Para mantener un gradiente de humedad relativa máxima (100%) a 23 ± 1 °C se dispuso agua destilada dentro de una vasija de almacenamiento donde se dejaron los recipientes. La tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) y la permeabilidad al vapor de agua (WVP) se calcularon a partir de las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$WVTR = \frac{\text{Cambio en la masa (g)}}{\text{Tiempo (s)} \times \text{Área transversal (m}^2\text{)}} \quad (11)$$

$$WVP = \frac{\text{Grosor película (mm)}}{\text{Diferencia de presión (Pa)}} \quad (12)$$

2.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó a partir del lenguaje de programación R (versión 4.3.1). Dado que se realizaron dos diseños de experimentos 3^2 (2 factores con 3 niveles) se analizaron los datos a partir de análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de confianza de 95%. Adicionalmente, las medias de las variables de respuesta se compararon mediante la prueba de múltiples rangos de Tukey en donde se establece que un valor $p < 0.05$ indica diferencias estadísticamente significativas entre grupos y los resultados fueron reportados a partir de sus valores medios con error estándar.

3. Resultados y análisis

3.1. Preparación de la pulpa de café

Los resultados del contenido de materia seca y humedad de la pulpa de café de la variedad Caturra Chiroso se reportan en la Tabla 2. La humedad fue de $79.7 \pm 2.1\%$, cuyo valor es cercano a los reportados por [46] para la especie *Coffea arabica*, que es precisamente el género del que se deriva la variedad Caturra Chiroso [47], donde se destaca un elevado contenido de humedad ($79.49 \pm 0.813\%$), que sumado al alto contenido de azúcares simples (20 – 30% de su composición) convierten a la pulpa de café en un residuo altamente susceptible a la descomposición microbiana y además le constituyen como un contaminante potencial [48], reafirmando la necesidad de desarrollar estrategias para valorizar este residuo.

Tabla 2. Contenido de materia seca y humedad en pulpa de café fresca

Residuo	Materia seca (%)	Humedad (%)
Pulpa fresca	$20.3 \pm 2.1\%$	$79.7 \pm 2.1\%$

En el contexto del secado, la etapa preliminar de secado bajo el sol en una superficie ventilada es una alternativa ambientalmente amigable, económica y accesible en las condiciones existentes en las despulpadoras de café y que, combinada con un posterior secado en horno, permite estabilizar la biomasa evitando su descomposición temprana y facilitando su almacenaje y transporte [26], asuntos que son de gran importancia si se considera el desarrollo de estrategias para valorizar la pulpa de café tales como la extracción de componentes activos como la pectina, aunque también para otras alternativas como la activación de los azúcares simples existentes en la pulpa de café para la obtención de bioetanol [48].

3.2. Extracción de pectina a partir de pulpa de café

Los resultados de la evaluación del efecto de la temperatura y el tiempo en la extracción de pectina de pulpa de café para la variedad Caturra Chiroso (*Coffea Arabica*) se precisan en la Tabla 3. Para este propósito se realizó un ANOVA para determinar la significancia de los resultados encontrados para el cual se obtuvo valor $p < 0.05$ que indica una alta significancia.

Tabla 3. Efecto de diferentes parámetros en el rendimiento de extracción de pectina de pulpa de café

Ensayo	Temperatura – T (°C)	Tiempo - t (min)	Rendimiento de extracción (%)
1: T25t30	25 - Ambiente	30	2.08 ± 0.24 ^d
2: T25t60	25 - Ambiente	60	2.37 ± 0.43 ^{cd}
3: T25t90	25 - Ambiente	90	2.40 ± 0.07 ^{bcd}
4: T50t30	50	30	2.23 ± 1.2 ^d
5: T50t60	50	60	4.35 ± 0.29 ^{bc}
6: T50t90	50	90	4.57 ± 1.01 ^b
7: T100t30	100	30	3.94 ± 0.68 ^{bcd}
8: T100t60	100	60	4.19 ± 0.04 ^{bcd}
9: T100t90	100	90	6.95 ± 0.78 ^a

Las letras en superíndice (a,b,c,d) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

En referencia a los resultados, se encontró que los mejores parámetros de extracción de pectina fueron los considerados en el ensayo 9: T100t90 (Temperatura - 100 °C y tiempo – 90 min) con un rendimiento de extracción de 6.95 ± 0.78 %. Por su parte, se halló que los efectos individuales de los factores temperatura y tiempo fueron significativos ($p < 0.05$) influenciando positivamente la extracción de pectina de pulpa de café, donde además la relación entre estos factores correspondió a una correlación positiva.

Esto se evidenció en que hubo una tendencia a un mayor rendimiento de extracción a temperaturas más altas, lo que se corroboró estadísticamente dado que la temperatura tuvo el efecto más significativo estadísticamente en el rendimiento de extracción ($p < 0.05$). Este resultado se atribuye a que una mayor temperatura permite romper con más facilidad la pared de las células vegetales y por tanto permite que para el ácido de extracción sea más sencillo recuperar la pectina [49], aunque este resultado también es atribuido parcialmente al tiempo [50]. En términos moleculares, a raíz de que la pectina consiste en un complejo heteropolisacárido compuesto de monómeros de ácido D-galacturónico que están enlazados mediante enlaces glucosídicos α (1→4), se estima que durante la hidrólisis estos enlaces de polímeros más grandes, especialmente derivados de la protopectina (componente de la pared celular), se rompen con mayor facilidad a temperaturas altas formando polímeros más pequeños para los que su solubilidad en agua es mayor, lo que facilita la extracción de pectina y por tanto generar rendimientos de extracción mayores [12], [51].

El valor máximo encontrado para el rendimiento de extracción según la metodología desarrollada (6.95 ± 0.78 %) fue mayor a los reportados para la pulpa de café *Coffea Arabica* (6.14 ± 0.18 %) [52], también para el polvo de papaya (2.6 %) [53] y para las cáscaras de banano (2.18%) [54], aunque fue considerablemente menor que para la cáscara de sandía (18.1 %) [55], para la cáscara de cacao (9.0 %) [56] y para el bagazo de manzana (16.8 %) [57]. Estas diferencias se atribuyen a que el rendimiento de la extracción de pectina se modula en gran medida por la composición química y las características estructurales de la fuente vegetal [24], en donde el bagazo de manzana y residuos de cítricos destacan, siendo incluso la fuente más común para la producción de pectina comercial [21]. De igual manera, la calidad de la pectina y el rendimiento recae en gran medida sobre el método de extracción [24], donde el ultrasonido tiene una eficiencia muy reducida con respecto a otros métodos como la extracción con solventes y la extracción asistida con microondas [58].

En lo que respecta a la extracción a partir de solventes, se ha encontrado que un incremento en el rendimiento está estrechamente relacionado con mayores valores de temperatura y tiempo, hasta un límite de 100 °C y 80 min respectivamente donde no hay diferencias significativas en la eficiencia final de la extracción [57]. Por otra parte, [28] estudió el efecto de la relación sólido – líquido encontrando que la relación óptima se encuentra en valores entre 1:20 y 1:25 (p/v) y concluyendo que una menor relación sólido – líquido hace difícil la separación de la pectina de la mezcla durante la extracción y además disminuye el contacto entre la pulpa de café y el solvente, lo que desencadena en una reducción de la difusión del ácido en la estructura del residuo. Este asunto ratifica el hecho de que el rendimiento óptimo de extracción de pectina a partir de pulpa de café de la variedad Arabica reportado por [59] fue mayor (13.7 ± 0.15 %) que el reportado en esta investigación (6.95 ± 0.78 %), dado que la relación sólido – líquido también fue mayor; específicamente de 1:20 (p/v) frente a 1:5 (p/v). Sin

embargo, en este estudio se pudo reducir el uso de solución de extracción, lo que implica un ahorro y también un menor impacto ambiental.

Desde otra perspectiva, mediante el estudio realizado por [60] se encontró que el efecto del pH sobre el rendimiento es significativo, maximizándolo cuando el pH fue de 2.0, que fue el valor empleado en esta investigación. Este efecto se atribuye a que valores bajos de pH promueven la disrupción acelerada de los enlaces de hidrógeno y enlaces glucosídicos entre la pectina y la pared celular, aumentando consigo la velocidad de difusión de la pectina y por tanto la extracción, que, en combinación con un valor adecuado en la relación sólido – líquido garantiza una mayor transferencia de masa a raíz de la saturación de la solución de extracción con iones H^+ . Esto se combina con el hecho de que en el estudio realizado por [28] el mayor rendimiento de extracción se logró a partir de H_2SO_4 (12.7%), que es un ácido que, al compararlo con otros de origen mineral (tales HCl y HNO_3), posee una mayor carga de iones H^+ por su naturaleza diprótica.

Aun así, a pesar de que la eficiencia de los ácidos minerales es superior, resulta esencial, en el contexto en el que la pectina se vaya a adoptar como reemplazo a los derivados de petroquímicos para los empaques, adoptar técnicas en las que se garantice una extracción óptima y sostenible para promover una economía circular [24]. Es por esto por lo que se recomienda, extender el diseño de experimentos a la evaluación de ácidos de extracción de fuentes verdes en donde se consideren diferentes relaciones sólido – líquido (tales como 1:10, 1:20 y 1:25 (m/v)).

3.3. Caracterización de la pectina extraída de pulpa de café

Para el tratamiento elegido (9: T100t90 - 100 °C y 90 min) se caracterizó la pectina respecto a sus propiedades químicas, como grado de metoxilación, grado de esterificación, peso equivalente y contenido de ácidos anhídruónicos (Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización química de la pectina obtenida a partir de pulpa de café

Prueba	Resultados
Peso equivalente (g/mol)	1458.3 ± 116.0
% R – OCH ₃ (%)	5.2 ± 0.4
DE (%)	59 ± 3.1
AUA (%)	49.7 ± 2.3

Las pectinas se pueden clasificar a partir de su contenido de metoxilo como de alto (HMP) o de bajo metoxilo (LMP). Puntualmente, las pectinas HMP deben tener un grado de metoxilación (% R – OCH₃) de al menos 6.70 % [34]. Además, respecto al grado de esterificación (DE), estas deben tener un valor superior al 50 % [61]. Para la pectina de pulpa de café obtenida se encontró un grado de metoxilación de 5.2 ± 0.4 % que indica que es de bajo metoxilo (LMP). No obstante, se encontró que esta tiene un grado de esterificación (DE) de 59 ± 3.1 % lo que no permite concluir respecto a su clasificación dado que este valor es mayor a 50%. En la literatura se han reportado diferentes valores para el grado de metoxilación (% R – OCH₃) y para el grado de esterificación (DE) de la pectina extraída a partir de pulpa de café. Por su parte, [49] encontró valores de 7.52 ± 0.19 % y 61.24 ± 0.91 % para % R – OCH₃ y DE respectivamente, mientras que [28] encontró valores de 7.13 % y 65.5%, por lo que ambos concluyeron que la pectina extraída (con H_2SO_4 0.1 M) de pulpa de café del género *Coffea arabica* es HMP. A este respecto, [50] reporta que la pectina extraída a partir de mucilago de café es HMP, sin embargo, los parámetros de extracción influyen significativamente en el valor final de % R – OCH₃, donde la relación sólido – líquido es la que mayor efecto tiene en su respuesta. Dicho autor investigó el efecto de la relación sólido – líquido en la extracción de pectina a partir de pulpa de café y encontró el % R – OCH₃ más bajo cuando esta fue de 1:5 (m/v), lo que sugiere que este parámetro moduló el bajo grado de metoxilación encontrado para la pectina extraída en esta investigación. Bajo este respecto, en la literatura se ha reportado que existe una correlación positiva entre el grado de metoxilación y pH alto en conjunto con una mayor relación sólido – líquido, que se complementa además con temperaturas bajas y tiempos cortos, y que se argumenta en virtud de que condiciones severas provocan una desesterificación de las cadenas de ácidos poligalacturónicos [62], [63].

En línea con esto, [34] encontró valores de 6.21 ± 0.0 para % R – OCH₃ y de 84.9 ± 1.7 % para DE que no le permitieron concluir frente a la clasificación de la pectina extraída a partir de mucílago de café. A raíz de ello, realizó espectroscopía Raman que, dado que dicha pectina reportó una banda a 1751 cm^{-1} que no está presente en LMP, le permitieron concluir que la pectina extraída fue HMP y que se complementó con sus posteriores hallazgos dado que dicha pectina logró formar películas. Es por esto por lo que, para complementar los resultados obtenidos y proponer una clasificación de la pectina obtenida, se recomienda realizar espectroscopía Raman en futuras investigaciones.

Por otra parte, el valor para el porcentaje de ácidos anhidroúronicos (AUA) fue de 49.7 ± 2.3 % y gracias a que es menor a 65% no es recomendado para ser usado como aditivo para aplicaciones farmacéuticas a raíz de que este valor sugiere una presencia significativa de impurezas [64], [65] Aun así, es de destacar que, al igual que para el % R – OCH₃, en esta propiedad influye significativamente los parámetros de extracción. En la literatura, se ha reportado que existe una correlación positiva entre el tiempo, la relación sólido – líquido y el contenido de AUA que se explica en virtud de que tiempos prolongados favorecen la transferencia de masa, mientras que una mayor relación sólido – líquido aumenta la solubilidad de la pectina en el ácido de extracción [66], [67]. Sin embargo, es destacable que al considerar las temperaturas altas en conjunto con grandes relaciones sólido – líquido, se ha encontrado, para el caso puntual del bagazo de manzana, una disminución en el contenido de AUA presente en la pectina extraída que se atribuye a una dilución excesiva que conlleva a una degradación parcial de las moléculas más pequeñas de ácido urónico que podrían no precipitarse [68]. En este sentido, para aumentar el contenido de AUA y por tanto disminuir las impurezas presentes en la pectina extraída a partir de pulpa de café, se recomienda explorar tiempos más prolongados en conjunto con mayores relaciones sólido – líquido, evitando considerar temperaturas más altas, cuya respuesta se podría evaluar a partir de un diseño de experimentos que considere las propiedades químicas resultantes como variables de respuesta.

Por último, el peso equivalente hallado fue de 1458.3 ± 116.0 g/mol, que es cercano a lo reportado por [34] y [28] para pectina de pulpa de *Coffea Arabica* y que se explica en virtud de que esta propiedad es dependiente del tipo de residuo empleado en la extracción [59].

3.4. Preparación de biopelículas de pectina a partir de biomasa residual de café

3.4.1. Ensayos preliminares con biopelículas de pectina producidas a partir de diferentes plastificantes

Los resultados de los ensayos preliminares (Tabla 1) se reportan en la Tabla 5. Se encontró que el tipo de plastificante posee un efecto significativo ($p < 0.05$) en las propiedades mecánicas de las películas de pectina resultantes, donde la mejor respuesta tanto en resistencia a la tracción (1.79 ± 0.21 MPa) como en el % de elongación (13.96 ± 2.69 %) se logró con sorbitol. A raíz de que plastificantes con menores masas molares facilitan las interacciones moleculares de tipo plastificante - polímero, a estos se les atribuye un efecto mayor en la plastificación que se relaciona con un aumento de elongación derivado precisamente de que los enlaces intermoleculares pectina – pectina son reemplazados por enlaces de hidrógeno (interacción plastificante – pectina) que reducen la rigidez de la matriz y promueven la flexibilidad de las películas al permitir una mayor movilidad de las cadenas moleculares [25]. En línea con esto, en la literatura se reporta que los termoplásticos plastificados con glicerol (92.09 g/mol) son generalmente más frágiles y más flexibles que los usan sorbitol (182.17g/mol) [69], además de que las películas plastificadas con PEG ($m_n \sim 5800$ en promedio) en grandes concentraciones ($> 40\%$) pueden provocar una separación de fases que supone como consecuencia un menor % de elongación [25], lo que explica los resultados frente a la resistencia a la tracción y el % de elongación, donde, con respecto al sorbitol, no se encontraron diferencias significativas con el PEG (1.55 ± 0.15 MPa) ni el glicerol (13.30 ± 1.36 %).

Tabla 5. Resultados de pruebas mecánicas para ensayos preliminares con películas de pectina

Plastificante	(%) Pectina	(% con respecto a pectina) Plastificante	Resistencia a la tracción (MPa)	(%) Elongación
Glicerol	3.5	30	1.09 ± 0.11 ^b	13.30 ± 1.36 ^{ab}
Sorbitol	3.5	30	1.79 ± 0.21 ^a	13.96 ± 2.69 ^a
PEG	3.5	30	1.55 ± 0.15 ^a	9.2 ± 2.61 ^b

Las letras en superíndice (a,b) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

Los resultados encontrados son congruentes con lo reportado por [70], donde películas de pectina formadas a partir de sorbitol como plastificante exhibieron mayores resistencias a la tracción (49.94 ± 0.37 MPa) que aquellas que se produjeron con glicerol (9.59 ± 0.13 MPa), escenario que se replicó para el % de elongación (17.98 ± 1.44 % frente a 14.46 ± 0.22 %). Asimismo, [71] reportó mayores valores para la resistencia a la tracción de películas de pectina producidas a partir de PEG de diferentes masas molares (200, 300, 400, 600, 1000) que las encontradas para el glicerol a las mismas concentraciones, aunque, el % de elongación fue mayor para el glicerol respecto a aquellas formulaciones con PEG de mayor masa molar ($m_n \sim 400, 600, 1000$), lo que se atribuyó a que el glicerol actuó como un plastificante interno, para el que su efecto en el % de elongación es más eficiente [72], mientras que el PEG lo hizo como un plastificante externo. Adicionalmente, es de destacar que el sorbitol posee una menor permeabilidad al vapor de agua frente al glicerol en virtud de su naturaleza menos higroscópica [73], además de que las películas producidas a partir de este plastificante son menos solubles en agua y además tienen un menor contenido de humedad [70], parámetros que son deseables en empaques ya que aportan una mayor estabilidad al material.

Es por esto por lo que, a partir de los resultados preliminares y el análisis realizado, se concluyó que el plastificante a emplear en el siguiente diseño de experimentos en términos de la respuesta obtenida para las propiedades mecánicas sería el sorbitol.

3.4.2. Evaluación del efecto de diferentes proporciones de pectina y plastificante en las propiedades mecánicas de biopelículas de pectina producidas a partir de biomasa residual de café

Posterior a la selección del plastificante, se realizó el diseño de experimentos cuya región experimental se describió en la Figura 7. Dicho diseño de experimentos tuvo como objetivo determinar el efecto de diferentes proporciones de pectina y plastificante en las propiedades mecánicas finales de las biopelículas y los resultados se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6. Evaluación del (%) pectina (P) y (% con respecto a pectina) plastificante (p) en la resistencia a la tracción y el % de elongación de las biopelículas

Ensayo	(%) Pectina	(% con respecto a pectina) Plastificante	Resistencia a la tracción (MPa)	(%) Elongación
1: P35p40	3.5	40	1.23 ± 0,15 ^e	14.93 ± 2,89 ^{bcd}
2: P35p20	3.5	20	1.37 ± 0,17 ^{de}	7,94 ± 1,84 ^e
3: P5p30	5	30	2.00 ± 0,32 ^{bc}	14.91 ± 4,13 ^{bcd}
4: P2p20	2	20	1.84 ± 0,26 ^{bcd}	9.11 ± 1,81 ^{de}
5: P2p40	2	40	1.53 ± 0,20 ^{cde}	12.86 ± 2,55 ^{cde}
6: P2p30	2	30	1.16 ± 0,34 ^e	9.86 ± 3,00 ^{de}
7: P5p40	5	40	2.28 ± 0,33 ^{ab}	22.75 ± 3,29 ^a
8: P35p30	3.5	30	1.91 ± 0,37 ^{bc}	17.13 ± 5,78 ^{abc}
9: P35p30	3.5	30	1.91 ± 0,37 ^{bc}	17.13 ± 5,78 ^{abc}
10: P5p20	5	20	2.62 ± 0,28 ^a	20.53 ± 3,99 ^{ab}

Las letras en superíndice (a,b,c,d,e) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

En referencia a los resultados, se determinó su significancia ($p < 0.05$) mediante ANOVA, encontrando que los efectos individuales de los factores pectina (%) y plastificante (% en referencia a la pectina) fueron significativos ($p < 0.05$) y además también lo fue su interacción. Es importante resaltar que el efecto más significativo ($p << 0.05$) correspondió al (%) de pectina, tanto para la respuesta obtenida en la resistencia a la tracción como para la que se obtuvo en el % de elongación. Se evidenció una tendencia hacia una mayor resistencia a la tracción y un mayor % de elongación a medida que aumentó el (%) de pectina, lo que se explica gracias a que las propiedades mecánicas están íntimamente relacionadas a la microestructura de la red de la película y a las fuerzas moleculares, que, para la región experimental trabajada, son potencialmente mayores en el nivel más alto de pectina (5 %) [74]. Sin embargo, es destacable que, a pesar de que una mayor proporción de pectina aumenta la densidad de la red polimérica, concentraciones elevadas pueden generar un sobreentrelazamiento de cadenas que reduce la movilidad molecular y limita la capacidad de redistribución de tensiones de baja carga aumentando la fragilidad de las películas resultantes [75]. Este asunto se combina con el hecho de que a concentraciones relativamente altas la viscosidad resultante de la solución a partir de la cual se forman las películas incrementa significativamente [76], dificultando un secado homogéneo y provocando potenciales gradientes de tensión interna que pueden desencadenar en películas con heterogeneidades estructurales que reducen su integridad mecánica global [77].

Los ensayos con la mayor respuesta en términos de la resistencia a la tracción se atribuyeron al ensayo 10: P5p20 y 7: P5p40 que obtuvieron valores de 2.62 ± 0.28 MPa y 2.28 ± 0.33 MPa respectivamente. La diferencia entre ambos ensayos radicó en el % de plastificante usado, donde el ensayo 10: P5p20 que obtuvo la mayor respuesta usó la menor cantidad de plastificante entre ambos. Esto puede deberse a que para esta formulación es dominante la interacción entre enlaces de hidrógeno producidos por la interacción intermolecular pectina – pectina frente a las interacciones entre pectina – plastificante lo que da resultado una estructura rígida [25]. Los resultados hallados son congruentes con lo reportado en la literatura donde se estima que para películas producidas a partir de pectina hay una disminución en la resistencia a la tensión al aumentar la concentración del plastificante en la formulación [18].

Asimismo, en los resultados hallados para el % de elongación se encontró que la mayor respuesta se atribuyó a los ensayos 7: P5p40 (22.75 ± 3.29 %) y 10: P5p20 (20.53 ± 3.99 %) respectivamente, donde el tratamiento que tuvo la mayor respuesta correspondió al que en su formulación tuvo la mayor proporción de plastificante entre ambos (7: P5p40). Estos resultados se argumentan dado que la función del agente plastificante consiste en la disminución de los enlaces intermoleculares entre matrices poliméricas (pectina – pectina) al sustituirlos por la interacción de enlaces hidrógeno entre el plastificante y la pectina que promueven la flexibilidad de las películas al facilitar la movilidad de las cadenas, cuyo efecto aumenta con proporciones más grandes de plastificante [25].

En coherencia con los resultados reportados, [25] encontró un aumento en el porcentaje de elongación de 21.52% a 22.31% al variar la concentración de sorbitol de 20% a 40% en películas de pectina (LMP), mientras que, respecto a la resistencia a la tracción, halló una disminución pequeña que no fue significativa ($p > 0.05$). De igual modo, [52] encontró para películas de pectina extraídas a partir de pulpa de café valores de 2.3 ± 0.6 MPa y 13.0 ± 7.9 % para la resistencia a la tracción y el % de elongación respectivamente, que son cercanos a hallados en la investigación a pesar de que empleó glicerol (20 %), Tween 20 (10%) y además celulosa bacteriana. No obstante, se encontraron diferencias para las propiedades mecánicas reportadas por [23] donde para películas producidas a partir de pectina extraída de cáscara de pomelo rojo en una concentración de 5% se encontró una resistencia a la tracción de 9.65 ± 0.19 MPa y un % de elongación de 7.15 ± 0.12 %. Sin embargo, estas diferencias se atribuyen a cambios en el método de preparación, además del tipo de pectina que puede variar según la fuente vegetal y al grosor final de las películas obtenidas [18].

Es destacable que las películas obtenidas, en referencia a las propiedades mecánicas, poseen valores menores que los de los plásticos derivados del petróleo, usados en el empaque de alimentos (e.g polietileno de baja densidad con valores de resistencia a la tracción de 10 – 12 MPa y % de elongación de 200 – 500%) [22]. Para solventar este escenario, que es recurrente en el desarrollo de biopolímeros, en la literatura se ha propuesto el desarrollo de materiales compuestos a partir de mezclas con otros biopolímeros, en donde, respecto a la pectina, se ha recomendado el uso de quitosano [72]. Asimismo, se ha recomendado el uso de rellenos de refuerzo como

nanomateriales de carbono, celulosa, entre otros, para mejorar su resistencia a la tracción [72]. Respecto a este escenario, [78] produjo películas con pectina (HMP) y Zeolita Y con potencial aplicación para empaques de alimentos para las que alcanzó una resistencia a la tracción de hasta 68 ± 3 MPa. La optimización de las propiedades mecánicas en películas producidas a partir de pectina resulta interesante a razón de que a diferencia de otros bioplásticos (tales como PLA o PBS) las películas de pectina tienen una alta biodegradabilidad en condiciones ambientales comunes, además de que son versátiles a diferentes procesos de degradación lo que les permite usarse en procesos de digestión anaeróbica [72]. En línea con esto, se propone para futuras investigaciones estudiar la incorporación de nanopartículas o rellenos de refuerzo para potenciar los resultados mecánicos de los mejores tratamientos estudiados (10:P5p20 y 7:P5p40).

Por otro lado, dado que los resultados hallados para los tratamientos 10:P5p20 y 7:P5p40 permitieron validar la formación de biopelículas de pectina a partir de pulpa de café *Coffea Arabica* (variedad Caturra Chiroso) y tuvieron las mejores respuestas respecto a las propiedades mecánicas en el diseño experimental, se emplearon para realizar su caracterización fisicoquímica.

3.5. Caracterización de las biopelículas de pectina seleccionadas

3.5.1. Opacidad y resistencia a los rayos UV

El espectro de UV-visible obtenido para las películas seleccionadas se graficó en la Figura 10. En esta es posible observar que el tratamiento 7:P5p40 tuvo una transmitancia de 16.57 %, mientras que para el tratamiento 10: P5p20 fue de 15.61%.

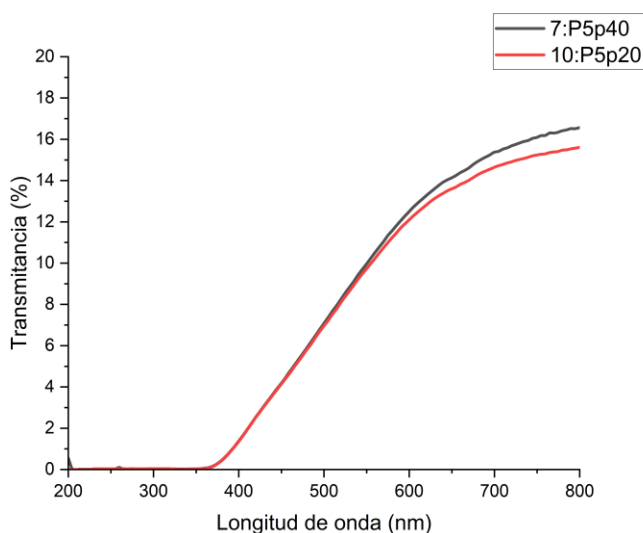


Figura 10. Transmitancia de películas de pectina de pulpa de *Coffea arabica* (variedad Caturra Chiroso) en el espectro UV-Visible

Por otra parte, los resultados encontrados para la opacidad se presentan en la Tabla 7. Se encontró una mayor opacidad en las películas producidas para el tratamiento 10:P5p20 (6.40 ± 0.14), sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) al compararlo con el tratamiento 7:P5p40 (6.16 ± 0.11). Este efecto se atribuye a que la transparencia de las películas de pectina se modula a partir de su concentración, donde mayores concentraciones suponen una red polimérica más densa que les permite dispersar en mayor proporción la luz [79]. Las pequeñas diferencias encontradas, a pesar de no ser significativas ($p > 0.05$), se vinculan con el hecho de que parámetros como la microestructura, los componentes y la composición del polímero resultante que modulan la transparencia final de las películas [80], no cambiaron significativamente dado que la única diferencia entre ambos tratamientos corresponde al % de plastificante.

Tabla 7. Opacidad asociada a las películas de pectina seleccionadas

Tratamiento	Opacidad
7: P5p40	6.16 ± 0.11 ^a
10:P5p20	6.40 ± 0.14 ^a

Las letras en superíndice (a) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

En la literatura se destaca que, en lo que respecta a las propiedades asociadas a los empaques de alimentos, la barrera frente a rayos UV es un factor representativo para garantizar la calidad de estos gracias a que la luz UV puede generar efectos negativos como la oxidación de lípidos y la pérdida de nutrientes [41]. Bajo esa perspectiva, se establece que las películas producidas poseen propiedades ópticas de interés que viabilizan su aplicación en empaques de alimentos. Sin embargo, dado que el color es un factor clave en la aceptación de los consumidores [41], se propone evaluar esta propiedad en futuras investigaciones.

3.5.2. Actividad antioxidante

La actividad antioxidante de las películas seleccionadas se evaluó a partir de sus fenoles totales y su capacidad de eliminación del radical ABTS (Tabla 8).

Tabla 8. Actividad antioxidante de películas de pectina producidas a partir de pulpa de café

Tratamiento	Capacidad de eliminación del radical ABTS (%)	Fenoles totales (mg GAE/g película)
7: P5p40	10.9 ± 0.34 ^b	8.06 ± 1.50 ^a
10:P5p20	17.7 ± 2.2 ^a	8.49 ± 2.11 ^a

Las letras en superíndice (a,b) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

Ambas películas tuvieron una capacidad de eliminación del radical ABTS, lo que demuestra su actividad antioxidante. La mayor respuesta se obtuvo para el tratamiento 10: P5p20 (17.7 ± 2.2 %) que se atribuye a una mayor disponibilidad de los compuestos antioxidantes en la película en virtud de una menor concentración de plastificante. No obstante, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en la cantidad de fenoles totales entre ambas películas, donde un valor ligeramente mayor se obtuvo para 10: P5p20 (8.49 ± 2.11^a mg GAE/g película).

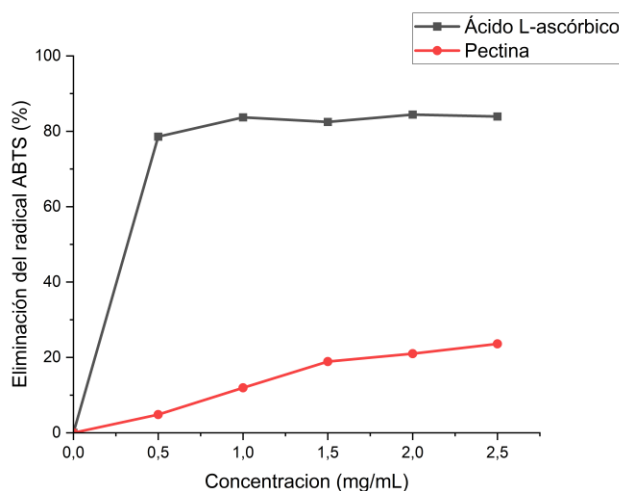
Los procesos de oxidación provocan la degradación de proteínas, lípidos y pigmentos presentes en los alimentos, lo que disminuye su calidad y acorta su vida útil [81]. A raíz de que los antioxidantes permiten retardar estos efectos nocivos, se ha considerado ampliamente su uso en empaques y, dado que el uso extensivo de antioxidantes sintéticos (e.g. butilhidroxianisol, dibutilhidroxitolueno, galato de propilo y terbutilhidroquinona) como aditivos de alimentos puede conducir potencialmente a problemas de salud como malformaciones o cáncer, se ha propuesto el uso de antioxidantes extraídos naturalmente que además de ser más seguros son sostenibles [82]. Por su parte, [81] estudió el desempeño antioxidante de películas preparadas a partir de polisacárido de soja soluble (SPSS) y extracto de cáscara de pomelo (PPE) y encontró una capacidad de eliminación del radical ABTS de 9.66 ± 0.441 hasta 91.68 ± 0.132 % al aumentar la concentración de PPE desde 0.00 hasta 0.07g/g SPSS, cuyo desempeño es cercano a lo obtenido en el presente estudio (17.7 ± 2.2) a concentraciones bajas de SPSS. Adicionalmente, este autor estudió la aplicación de dichas películas como empaque de manteca de cerdo y encontró una reducción en la oxidación de este alimento que significó un aumento de 4.75 a 25 días en su vida útil, lo que sugiere el gran potencial que tienen los antioxidantes de fuentes naturales en empaques de alimentos.

Asimismo, en relación con lo reportado en la literatura, se hallaron resultados similares a [20] donde se evaluó la actividad antioxidante de películas producidas a partir de pectina extraída de cáscara de mandarina y se encontró una eliminación de radicales ABTS de 8.32 ± 1.36 % atribuida únicamente a la pectina, cuya actividad antioxidante estuvo estrechamente asociada con la cantidad de fenoles totales presente en las películas (5 mg

GAE/g película). Además, al considerar la adición de 1.4% de extracto de hoja de salvia (SLE), la capacidad de eliminación de radicales ABTS aumentó hasta 73.66 ± 0.89 %. Es por esto por lo que, a pesar de la actividad antioxidante evidenciada en las biopelículas obtenidas, se recomienda investigar la incorporación de extractos naturales (e.g SLE) si se requiere una alta actividad en aplicaciones específicas, ya que se ha encontrado que estos compuestos afectan las propiedades mecánicas resultantes.

Por otra parte, se midió la eficacia de la pectina extraída para eliminar radicales ABTS a diferentes concentraciones, comparándola con la actividad de la vitamina C (Figura 11), encontrándose que la pectina elimina radicales ABTS, pero con valores inferiores a los alcanzados con ácido L-ascórbico. Aunque la literatura reporta actividad antioxidante para la pulpa de café secada bajo condiciones controladas (70 °C en horno, alcanzando 10.90 ± 0.63 mg Trolox/g de pulpa seca), es notable que los métodos de secado que exponen la biomasa al sol y, por tanto, a los rayos UV, favorecen la degradación de los compuestos sensibles responsables de dicha actividad antioxidante [14]. Del mismo modo, es de destacar que estos compuestos son termolábiles, por lo que temperaturas elevadas (desde 120 °C) también favorecen su degradación [83]. En consecuencia, para futuras investigaciones se propone evitar el secado al sol y también a altas temperaturas si se desea maximizar la actividad antioxidante natural de la pulpa de café.

Figura 11. Capacidad de eliminación del radical ABTS (%)



3.5.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías SEM para las películas seleccionadas se muestran en la Figura 12. El tratamiento 7:P5p40 presentó una morfología homogénea, con fragmentos planos y con una estructura laminar y escamosa sin cavidades que sugiere una buena compatibilidad entre los componentes de la matriz. Por otra parte, para el tratamiento 10:P5p20 se encontró una superficie con fragmentos más dispersos, acompañados de una menor uniformidad y con una estructura menos continua, aunque también homogénea y sin cavidades. Dichas diferencias se atribuyen a una menor plastificación provocadas por el menor % de plastificante asociado al tratamiento 10: P5p20.

Por otra parte, para la sección transversal del tratamiento 7:P5p40 se observó un grosor compacto, con fases ligeramente porosas atribuibles a una integración adecuada entre los diferentes componentes presentes en las películas sin evidenciar la formación de grietas, mientras que para 10:P5p20 se evidenció una menor porosidad aparente, con una superficie más densa, continua y con la presencia de ligeras grietas espaciadas a lo largo de

la sección transversal. A raíz de que una superficie uniforme y homogénea es deseada en la producción de películas, precisamente porque dicha conformación contribuye a una mejora en la resistencia mecánica y en las propiedades de barrera de las películas formadas [84], se establece que el mejor tratamiento en términos de la morfología estructural fue 7:P5p40. Frente a esto es de destacar que según la literatura una estructura más compacta en la conformación de la matriz de las películas desencadena un menor permeabilidad de vapor, además de una menor solubilidad de las películas; características deseables en empaques [85].

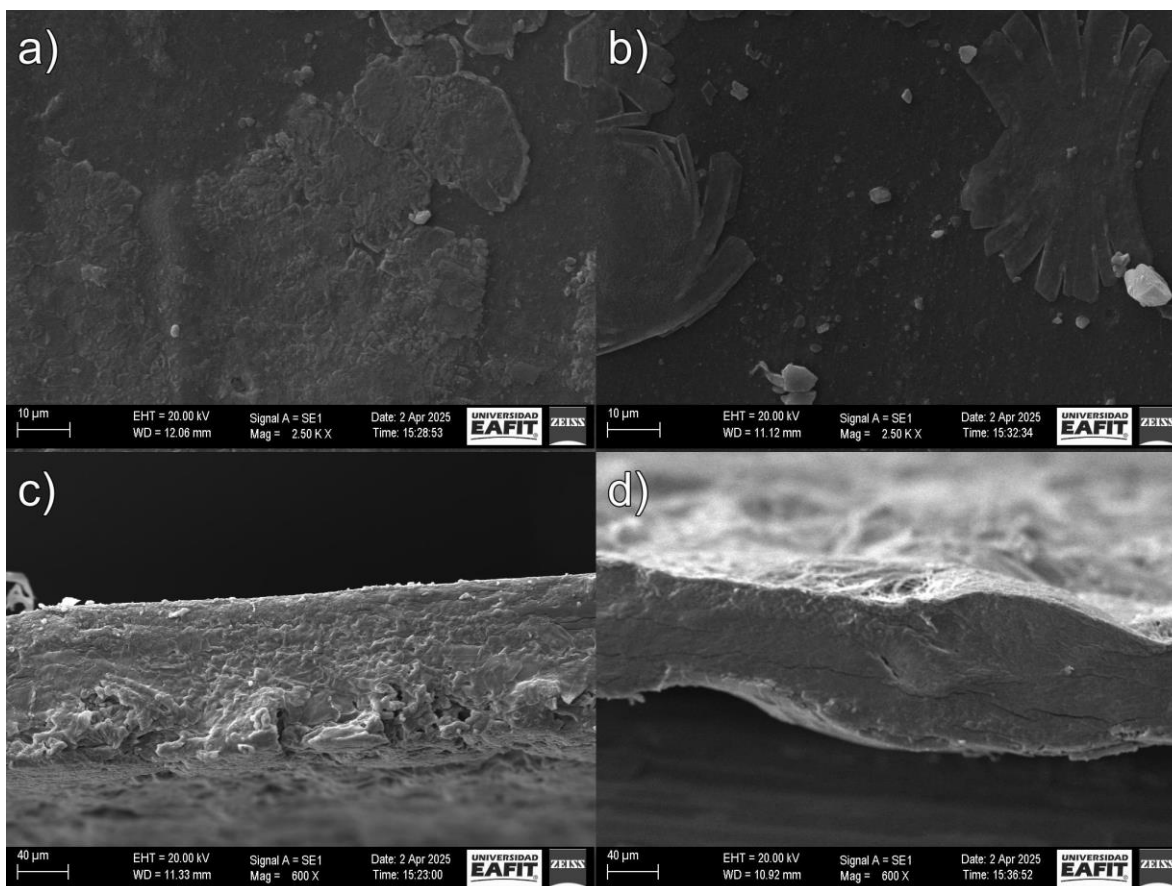


Figura 12. Micrografía superficial para las películas a) 7:P5p40 b) 10:P5p20 y transversal para c) 7:P5p40 y d) 7:P5p20

3.5.4. Permeabilidad al vapor de agua (WVP)

Los resultados de permeabilidad al vapor de agua (WVP) de las películas seleccionadas (Tabla 9) no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), algo que se atribuye a que los parámetros de ambos tratamientos son muy similares, a excepción del % de plastificante. Sin embargo, en función con lo que se precisó en el SEM, el tratamiento 7:P5p40 exhibe ligeramente un menor WVP que se argumenta gracias a que su estructura es más homogénea y carece de grietas en la sección transversal. Del mismo modo, los resultados para la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las biopelículas evaluadas, en donde el tratamiento 7: P5p40 ($43.60 \pm 2.17 \text{ g/h m}^2$) tuvo un WVTR levemente menor a 10: P5p20 ($46.02 \pm 1.42 \text{ g/h m}^2$), lo cual se relaciona estrechamente con los resultados obtenidos para WVP dado que una menor tasa de transmisión de vapor de agua supone una menor permeabilidad al agua.

Tabla 9. Permeabilidad al vapor de agua encontrada para las películas de pectina producidas a partir de pulpa de *Coffea arabica*

Tratamiento	WVTR ($\frac{\text{g}}{\text{h m}^2}$)	WVP ($\times 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}}$)
7: P5p40	43.60 \pm 2.17 ^a	5.44 \pm 0.27 ^a
10:P5p20	46.02 \pm 1.42 ^a	5.64 \pm 0.17 ^a

Las letras en superíndice (a) indican una diferencia significativa ($p < 0,05$) dentro de la misma columna

Los resultados hallados son cercanos a los reportados por [80] donde para películas producidas con 5% de pectina y glicerol el WVP fue de $1.16 \pm 0.06 (\times 10^{-11} \text{ kg/ m s Pa})$. Asimismo, son cercanos a lo reportado por [86] que desarrolló películas a partir de pectina HMP y obtuvo un WVP de $5.12 (\times 10^{-11} \text{ kg/ m s Pa})$. Por su parte, [70] halló valores para WVP de $4.02 \pm 0.00 (\times 10^{-10} \text{ kg/ m s Pa})$ para películas de pectina plastificadas con sorbitol, haciendo hincapié en que las películas producidas a partir de sorbitol poseen una mayor barrera al vapor de agua frente a las producidas con glicerol debido a su menor naturaleza higroscópica.

En línea con ello, [87] destaca que una baja WVP es fundamental para el desempeño de los empaques activos, ya que minimiza el intercambio de humedad y, de esta forma, preserva la calidad y la vida útil del alimento. Por otro lado, cabe destacar que un WVP bajo también es fundamental para producción de biopelículas comestibles cuya aplicación es especialmente interesante para la conservación de alimentos frescos [79]. Particularmente algunos bioplásticos estándar tales como el ácido poliláctico (PLA) y el polihidroxialcanoatos (PHA), usados para fabricar empaques, dispositivos médicos y otros productos, tienen un WVP de alrededor de $1 - 3 (\times 10^{-11} \text{ g/ m s Pa})$ [88], cuyo valor es menor al obtenido en el presente estudio. Para disminuir el valor obtenido de WVP en películas obtenidas a partir de pectina, [89] incorporó nanofibra de celulosa (CNF) logrando valores de WVP de $4 - 6 (\times 10^{-10} \text{ g/ m s Pa})$ que son cercanos a los que poseen el PLA y el PHA. A pesar de que el valor obtenido de WVP para las biopelículas producidas en esta investigación es más grande que el reportado para bioplásticos estándar, se recomienda su uso para la conservación de alimentos frescos, aunque se sugiere minimizar su respuesta para incrementar su potencial en diferentes aplicaciones [88].

Es por esto por lo que, en concordancia con lo reportado, los resultados encontrados ($5.44 \pm 0.27 \times 10^{-10} \text{ kg/ m s Pa}$) sugieren que las películas desarrolladas poseen un WVP adecuado que las posiciona como candidatas promotoras para aplicaciones en empaques de alimentos, especialmente para alimentos frescos.

4. Conclusiones

En este trabajo se demostró que la pulpa residual de café (*Coffea arabica* variedad Caturra Chiros) constituye una fuente viable de pectina para la producción de biopelículas. El proceso de extracción en medio ácido (H_2SO_4 0.1 M) permitió obtener una pectina con un rendimiento máximo de $6.95 \pm 0.78 \%$ (100 °C y 90 min), lo que evidencia la factibilidad técnica de valorizar este residuo agroindustrial. La caracterización química de la pectina reveló un grado de esterificación (% DE) de $59 \pm 3.1 \%$, un grado de metoxilación (% R – OCH_3) de $5.2 \pm 0.4 \%$ y un contenido de ácidos anhidrouónicos (AUA) de $49.7 \pm 2.3 \%$, propiedades que, en conjunto, permiten confirmar su idoneidad para formar redes gelificantes y, consecuentemente, películas adecuadas para aplicación potencial en empaques. Aun así, dado que se obtuvo un % R – OCH_3 menor a 6.7%, se sugiere complementar los resultados obtenidos para futuras investigaciones realizando espectroscopía Raman con el objetivo de precisar la clasificación de la pectina obtenida en alto (HMP) o bajo contenido (LMP) de metoxilo.

La formulación de biopelículas mediante el método de *solvent casting*, utilizando concentraciones de pectina de 2 a 5 % y sorbitol como plastificante en rangos del 20 al 40 % (en relación con la pectina), generó materiales con propiedades mecánicas destacables. En particular, la formulación que empleó 5 % de pectina y 40 % de sorbitol mostró los mejores resultados, obteniéndose una resistencia a la tracción de $2.28 \pm 0.33 \text{ MPa}$ y un porcentaje de elongación de $22.75 \pm 3.29 \%$. Estos valores, aunque inferiores a los de algunos plásticos derivados del petróleo, son competitivos cuando se consideran las ventajas ambientales inherentes de los biopolímeros, tales como su alta biodegradabilidad y la versatilidad en procesos de degradación, aspectos cruciales en el marco de la sostenibilidad. Adicionalmente, las biopelículas formadas presentaron una actividad

antioxidante moderada (eliminación de radicales ABTS de 17.7 ± 2.2 % y fenoles totales de 8.06 ± 1.50 mg GAE/g película) y una permeabilidad al vapor de agua (WVP) de 5.44 ± 0.27 ($\times 10^{-10}$ kg/ m s Pa), valores comparables a los reportados en estudios de biopolímeros similares, lo cual refuerza su potencial para empaques al minimizar el intercambio de humedad y preservar la calidad de los alimentos. El análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) evidenció estructuras superficiales homogéneas y secciones transversales compactas, sin cavidades ni grietas, lo que indica una buena compatibilidad entre los componentes de la matriz. Adicionalmente, se encontró una opacidad de 6.16 ± 0.11 y una transmitancia de 16.57% en el espectro UV-visible, propiedades que sugieren un buen desempeño como barrera frente a rayos UV y que son de interés dado que esto permite mitigar efectos negativos como la oxidación de lípidos y la pérdida de nutrientes.

En síntesis, este trabajo valida el uso de la pulpa de café como materia prima para la obtención de pectina y la formulación de biopelículas, ofreciendo una estrategia innovadora para el manejo de residuos agrícolas y la producción de materiales sostenibles con potencial aplicación en empaques. No obstante, se sugiere que investigaciones futuras se orienten a profundizar en la optimización de las propiedades mecánicas y funcionales de las biopelículas producidas, por ejemplo, mediante la incorporación de nanomateriales o la combinación con otros biopolímeros. Tales mejoras podrían permitir desarrollar un bioplástico competitivo que pueda, de manera efectiva, sustituir a los materiales convencionales derivados del petróleo, impulsando así la economía circular y favoreciendo una mayor sostenibilidad en la industria de empaques.

Referencias

- [1] W. Czekala *et al.*, «Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption», *Energy*, vol. 276, ago. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127604.
- [2] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, «Informe de Gestión 2023», jun. 2024. Consultado: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/informe-de-gestion-2023/>
- [3] «Coffee Statistics», Federación Nacional de Cafeteros. Consultado: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/coffee-statistics/?lang=en>
- [4] «Coffee production in Brazil 2024», Statista. Consultado: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/806275/production-coffee-volume-brazil/>
- [5] O. L. Ocampo-López y L. M. Álvarez-Herrera, «Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia», *Apunt. Cenes*, vol. 36, n.º 64, pp. 139-165, dic. 2017.
- [6] Roberto Vélez Vallejo, «Informe de gestión 2015 - 2022». Consultado: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.flipsnack.com/federaciondefcafeteros/informe-de-gestion-2015-2022/full-view.html>
- [7] L. V. Mendoza y C. G.-M. Aparicio, «Impactos socioeconómicos de la producción de café en Colombia», *Rev. Científica UCSA*, vol. 10, n.º 2, Art. n.º 2, oct. 2023, doi: 10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.02.043.
- [8] A. Hejna, «Potential applications of by-products from the coffee industry in polymer technology – Current state and perspectives», *Waste Manag.*, vol. 121, pp. 296-330, feb. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.12.018.
- [9] E. Pagliarini *et al.*, «Valorization of coffee wastes as plant growth promoter in mulching film production: A contribution to a circular economy», *Sci. Total Environ.*, vol. 871, may 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162093.
- [10] G. Dattatraya Saratale *et al.*, «A review on valorization of spent coffee grounds (SCG) towards biopolymers and biocatalysts production», *Bioresour. Technol.*, vol. 314, p. 123800, oct. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123800.
- [11] S. K. Karmee, «A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites», *Waste Manag.*, vol. 72, pp. 240-254, feb. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.10.042.
- [12] S. Chamyuang, A. Owatworakit, U. Intatha, y S. Duangphet, «Coffee pectin production: An alternative way for agricultural waste management in coffee farms», *ScienceAsia*, vol. 47S, n.º 1, p. 90, 2021, doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.S003.
- [13] M. R. Adams y J. Dougan, «Waste Products», en *Coffee*, R. J. Clarke y R. Macrae, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, pp. 257-291. doi: 10.1007/978-94-009-3417-7_9.

- [14] T. M. Kieu Tran, T. Kirkman, M. Nguyen, y Q. Van Vuong, «Effects of drying on physical properties, phenolic compounds and antioxidant capacity of Robusta wet coffee pulp (*Coffea canephora*)», *Heliyon*, vol. 6, n.º 7, p. e04498, jul. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04498.
- [15] G. Saucedo-Castañeda, G. G. Pérez-Morales, M. T. Torres-Mancera, M. A. Ramírez-Coronel, y M. A. Arellano-González, «Antioxidant Activity of Fermented and Nonfermented Coffee (*Coffea arabica*) Pulp Extracts», *Food Technol. Biotechnol.*, vol. 49, n.º 3, pp. 374-378, ene. 2011.
- [16] S. Avallone, J. -P. Guiraud, B. Guyot, E. Olguin, y J. -M. Brillouet, «Polysaccharide Constituents of Coffee-Bean Mucilage», *J. Food Sci.*, vol. 65, n.º 8, pp. 1308-1311, nov. 2000, doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb10602.x.
- [17] M. Kumari, S. Singh, y A. K. Chauhan, «A Comparative Study of the Extraction of Pectin from Kinnow (*Citrus reticulata*) Peel Using Different Techniques», *Food Bioprocess Technol.*, 2023, doi: 10.1007/s11947-023-03059-4.
- [18] S. Šešlija *et al.*, «Edible blend films of pectin and poly(ethylene glycol): Preparation and physico-chemical evaluation», *Food Hydrocoll.*, vol. 77, pp. 494-501, abr. 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.10.027.
- [19] J. Müller-Maatsch *et al.*, «Pectin content and composition from different food waste streams», *Food Chem.*, vol. 201, pp. 37-45, jun. 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.01.012.
- [20] H. Han y K. B. Song, «Antioxidant activities of mandarin (*Citrus unshiu*) peel pectin films containing sage (*Salvia officinalis*) leaf extract», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 55, n.º 9, pp. 3173-3181, sep. 2020, doi: 10.1111/ijfs.14581.
- [21] R. A. Siqueira *et al.*, «Pequi mesocarp: a new source of pectin to produce biodegradable film for application as food packaging», *Food Sci. Technol.*, vol. 42, p. e71421, 2022, doi: 10.1590/fst.71421.
- [22] M. Umaña, S. Simal, E. Dalmau, C. Turchiuli, y C. Chevigny, «Evaluation of Different Pectic Materials Coming from Citrus Residues in the Production of Films», *Foods*, vol. 13, n.º 13, p. 2138, jul. 2024, doi: 10.3390/foods13132138.
- [23] A. Sood y C. S. Saini, «Red pomelo peel pectin based edible composite films: Effect of pectin incorporation on mechanical, structural, morphological and thermal properties of composite films», *Food Hydrocoll.*, vol. 123, p. 107135, feb. 2022, doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.107135.
- [24] I. P. Butler, R. A. Banta, A. A. Tyuftin, J. Holmes, S. Pathania, y J. Kerry, «Pectin as a biopolymer source for packaging films using a circular economy approach: Origins, extraction, structure and films properties», *Food Packag. Shelf Life*, vol. 40, p. 101224, dic. 2023, doi: 10.1016/j.fpsl.2023.101224.
- [25] P. Jantrawut, T. Chaiwarit, K. Jantanasakulwong, C. Brachais, y O. Chambin, «Effect of Plasticizer Type on Tensile Property and In Vitro Indomethacin Release of Thin Films Based on Low-Methoxyl Pectin», *Polymers*, vol. 9, n.º 7, p. 289, jul. 2017, doi: 10.3390/polym9070289.
- [26] M. Serrat-Díaz, Á. D. De la Fé-Isaac, J. A. De la Fé-Isaac, y C. Montero-Cabrales, «Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta», *Rev. Cuba. Quím.*, vol. 30, n.º 3, pp. 522-538, dic. 2018.
- [27] L. H. Reichembach y C. L. de Oliveira Petkowicz, «Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties», *Carbohydr. Polym.*, vol. 245, p. 116473, oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116473.
- [28] G. Biratu, G. Gonfa, M. Bekele, y H. W. Woldemariam, «Extraction and characterization of pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp obtained from four different coffee producing regions», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 274, p. 133321, ago. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133321.
- [29] P. A. Patra y U. C. Basak, «Physicochemical Characterization of Pectin Extracted from Six Wild Edible Fruits in Odisha, India», *Curr. Res. Nutr. Food Sci. J.*, pp. 402-409, ago. 2020, doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.05.
- [30] H. S. Owens y A. Western Regional Research Laboratory, *Methods used at Western Regional Research Laboratory for extraction and analysis of pectic materials*. [Albany, CA] : Bureau of Agricultural and Industrial Chemistry, Agricultural Research Administration, U.S. Dept. of Agriculture, 1952. Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/methodsusedatwes340owen>
- [31] National Research Council, *Food Chemicals Codex*, 2nd ed. (Third Supplement to F.C.C. II). Washington: National Academy of Sciences, 1978.
- [32] M. O. Faruque, N. Kamrul, A. Begum, M. Mazumder, y M. Uddin, «Effect of extraction methods on the characteristics of pectin from mango peel wastes», *Int. J. Agric. Food Sci.*, vol. 6, n.º 2, pp. 70-75, 2016.

- [33] R. Priyadarshi, Z. Riahi, y J. W. Rhim, «Antioxidant pectin/pullulan edible coating incorporated with *Vitis vinifera* grape seed extract for extending the shelf life of peanuts», *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 183, ene. 2022, doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111740.
- [34] M. Valdespino-León *et al.*, «Biodegradable Electrospayed Pectin Films: An Alternative to Valorize Coffee Mucilage», *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, n.º 5, pp. 2477-2494, may 2021, doi: 10.1007/s12649-020-01194-z.
- [35] M. R. Sharaby, E. A. Soliman, A. B. Abdel-Rahman, A. Osman, y R. Khalil, «Novel pectin-based nanocomposite film for active food packaging applications», *Sci. Rep.*, vol. 12, n.º 1, p. 20673, nov. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-25192-4.
- [36] T. I. A. Gouveia, K. Biernacki, M. C. R. Castro, M. P. Gonçalves, y H. K. S. Souza, «A new approach to develop biodegradable films based on thermoplastic pectin», *Food Hydrocoll.*, vol. 97, p. 105175, dic. 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105175.
- [37] V. A. Gaona-Sánchez, G. Calderón-Domínguez, E. Morales-Sánchez, J. J. Chanona-Pérez, I. Arzate-Vázquez, y E. Terrés-Rojas, «Pectin-based films produced by electrospaying», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 133, n.º 34, 2016, doi: 10.1002/app.43779.
- [38] S. Šešlija, A. Nešić, M. L. Škorić, M. K. Krušić, G. Santagata, y M. Malinconico, «Pectin/Carboxymethylcellulose Films as a Potential Food Packaging Material», *Macromol. Symp.*, vol. 378, n.º 1, p. 1600163, abr. 2018, doi: 10.1002/masy.201600163.
- [39] D20 Committee, *Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. doi: 10.1520/D0882-18.
- [40] V. A. Gaona-Sánchez *et al.*, «Preparation and characterisation of zein films obtained by electrospaying», *Food Hydrocoll.*, vol. 49, pp. 1-10, jul. 2015, doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.03.003.
- [41] F. Hernandez-Tenorio, A. A. Saez, D. A. Palacio, E. Galeano, L. D. Marin-Palacio, y C. Giraldo-Estrada, «Formulations based on pullulan and a derivative as coating material for the food sector», *Carbohydr. Polym.*, vol. 342, p. 122393, oct. 2024, doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122393.
- [42] P. Yi, H. Guo, Y. Zhou, K. Zhong, Y. Wu, y H. Gao, «Development of apple pectin/chitosan-based active films integrated with apple polyphenol/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex for pork preservation», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 282, p. 136895, dic. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.136895.
- [43] L. R. Palomino G., C. M. García P., J. H. Gil G., B. A. Rojano, y D. L. Durango R., «DETERMINATION OF PHENOLIC CONTENT AND EVALUATION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY OF PROPOLIS FROM ANTIOQUIA (COLOMBIA)», *Vitae*, vol. 16, n.º 3, pp. 388-395, nov. 2009, doi: 10.17533/udea.vitae.3020.
- [44] D. Piñeros-Hernandez, C. Medina-Jaramillo, A. López-Córdoba, y S. Goyanes, «Edible cassava starch films carrying rosemary antioxidant extracts for potential use as active food packaging», *Food Hydrocoll.*, vol. 63, pp. 488-495, feb. 2017, doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.09.034.
- [45] C16 Committee, *Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials*. doi: 10.1520/E0096_E0096M-24A.
- [46] S. Rohaya, S. H. Anwar, A. B. Amhar, A. Sutriana, y M. Muzaifa, «Antioxidant activity and physicochemical composition of coffee pulp obtained from three coffee varieties in Aceh, Indonesia», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1182, n.º 1, p. 012063, jun. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1182/1/012063.
- [47] M. Chica-Acosta y J. Gregorio Martínez, «Demostrando la existencia de una nueva variedad de café (Var. Caturra Chiroso) en la especie *Coffea arábica* L. del suroeste de Antioquia», presentado en 9a Feria de biotecnología, 2020, p. 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2020/12/4.8.-Demostrando-la-existencia-de-una-nueva-variedad-de-caf%C3%A9-Var.-Caturra-Chiroso-en-la-especie-Coffea-ar%C3%A1bica-L.-del-suroeste-de-Antioquia.pdf>
- [48] R. Gurram, M. Al-Shannag, S. Knapp, T. Das, E. Singasaas, y M. Alkasrawi, «Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: a renewable feedstock», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 18, n.º 1, pp. 269-278, ene. 2016, doi: 10.1007/s10098-015-1015-9.
- [49] M. Muzaifa, D. Hasni, J. Munandar, I. Sulaiman, D. Rahmad, y R. A. Basyamfar, «Effect of temperature and extraction time on quality of pectin from arabica coffee pulp», *Agrointek J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 17, n.º 4, Art. n.º 4, dic. 2023, doi: 10.21107/agrointek.v17i4.15234.
- [50] U. Hasanah *et al.*, «Isolation of Pectin from coffee pulp Arabica Gayo for the development of matrices membrane», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 523, n.º 1, p. 012014, may 2019, doi: 10.1088/1757-899X/523/1/012014.

- [51] L. C. Vriesmann, R. F. Teófilo, y C. Lúcia De Oliveira Petkowicz, «Extraction and characterization of pectin from cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.) with citric acid», *LWT*, vol. 49, n.º 1, pp. 108-116, nov. 2012, doi: 10.1016/j.lwt.2012.04.018.
- [52] A. Vallejos-Jiménez *et al.*, «Development of Novel Pectin-Based Films from Coffee Waste: Mucilage and Pulp», *Waste Biomass Valorization*, mar. 2025, doi: 10.1007/s12649-025-02926-9.
- [53] X. Li, Z. Liu, y B. Lu, «Ultrasonic-assisted extraction of pectin from chaenomeles», *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, n.º 11, pp. 4115-4120, nov. 2014, doi: 10.1007/s11771-014-2406-5.
- [54] G. J. Swamy y K. Muthukumarappan, «Optimization of continuous and intermittent microwave extraction of pectin from banana peels», *Food Chem.*, vol. 220, pp. 108-114, abr. 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.197.
- [55] D. Mamiru y G. Gonfa, «Extraction and characterization of pectin from watermelon rind using acetic acid», *Heliyon*, vol. 9, n.º 2, feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13525.
- [56] L. C. Vriesmann, R. F. Teófilo, y C. L. D. O. Petkowicz, «Optimization of nitric acid-mediated extraction of pectin from cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.) using response surface methodology», *Carbohydr. Polym.*, vol. 84, n.º 4, pp. 1230-1236, abr. 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.01.009.
- [57] M. V. Marcon, L. C. Vriesmann, G. Wosiacki, E. Beleski-Carneiro, y C. L. O. Petkowicz, «Pectins from apple pomace», *Polímeros*, vol. 15, n.º 2, pp. 127-129, jun. 2005, doi: 10.1590/S0104-14282005000200012.
- [58] F. Dranca, E. Talón, M. Vargas, y M. Oroian, «Microwave vs. conventional extraction of pectin from *Malus domestica* 'Fálticeni' pomace and its potential use in hydrocolloid-based films», *Food Hydrocoll.*, vol. 121, p. 107026, dic. 2021, doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.107026.
- [59] G. Biratu, H. W. Woldemariam, y G. Gonfa, «Optimization of pectin yield extracted from coffee Arabica pulp using response surface methodology», *Heliyon*, vol. 10, n.º 8, p. e29636, abr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29636.
- [60] J. Pérez, K. Gómez, y L. Vega, «Optimization and Preliminary Physicochemical Characterization of Pectin Extraction from Watermelon Rind (*Citrullus lanatus*) with Citric Acid», *Int. J. Food Sci.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/3068829.
- [61] A. Kumar y G. S. Chauhan, «Extraction and characterization of pectin from apple pomace and its evaluation as lipase (steapsin) inhibitor», *Carbohydr. Polym.*, vol. 82, n.º 2, pp. 454-459, sep. 2010, doi: 10.1016/j.carbpol.2010.05.001.
- [62] S. Bilraheem, S. Srinuanpan, B. Cheirsilp, A. Upaichit, F. Kawai, y U. Thumarat, «Optimization of Pectin Extraction from Melon Peel as a New Source of Pectin and Pectin Hydrolysate with Prebiotic Potential», *Foods*, vol. 13, n.º 16, p. 2554, ago. 2024, doi: 10.3390/foods13162554.
- [63] Z. Raji, F. Khodaiyan, K. Rezaei, H. Kiani, y S. S. Hosseini, «Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 98, pp. 709-716, may 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.146.
- [64] P. Khamsucharit, K. Laohaphatanalert, P. Gavinlertvatana, K. Sriroth, y K. Sangseethong, «Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties», *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 27, n.º 3, pp. 623-629, jun. 2018, doi: 10.1007/s10068-017-0302-0.
- [65] C. D. May, «Industrial pectins: Sources, production and applications», *Carbohydr. Polym.*, vol. 12, n.º 1, pp. 79-99, ene. 1990, doi: 10.1016/0144-8617(90)90105-2.
- [66] C. Colodel, L. C. Vriesmann, R. F. Teófilo, y C. L. De Oliveira Petkowicz, «Optimization of acid-extraction of pectic fraction from grape (*Vitis vinifera* cv. Chardonnay) pomace, a Winery Waste», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 161, pp. 204-213, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.05.272.
- [67] S. H. Jong, N. Abdullah, y N. Muhammad, «Optimization of low-methoxyl pectin extraction from durian rinds and its physicochemical characterization», *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 5, p. 100263, jun. 2023, doi: 10.1016/j.carpta.2022.100263.
- [68] H. Garna *et al.*, «Effect of Extraction Conditions on the Yield and Purity of Apple Pomace Pectin Precipitated but Not Washed by Alcohol», *J. Food Sci.*, vol. 72, n.º 1, ene. 2007, doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00227.x.
- [69] A. S. Abu Ubaidah, N. I. Mohamad Puad, F. Hamzah, A. S. Azmi, y Y. Ahmad Nor, «Synthesis of bioplastics and the effects of additives on the mechanical, thermal and biodegradable properties», *Polym. Renew. Resour.*, vol. 15, n.º 4, pp. 430-490, nov. 2024, doi: 10.1177/20412479241292148.
- [70] M. Aitboulahsen, O. El Galiou, A. Laglaoui, M. Bakkali, y M. Hassani Zerrouk, «Effect of plasticizer type and essential oils on mechanical, physicochemical, and antimicrobial characteristics of gelatin,

- starch, and pectin-based films», *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, n.º 6, jun. 2020, doi: 10.1111/jfpp.14480.
- [71] S. D. Pasini Cabello, E. A. Takara, J. Marchese, y N. A. Ochoa, «Influence of plasticizers in pectin films: Microstructural changes», *Mater. Chem. Phys.*, vol. 162, pp. 491-497, jul. 2015, doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.06.019.
- [72] X. Zhao, K. Cornish, y Y. Vodovotz, «Narrowing the Gap for Bioplastic Use in Food Packaging: An Update», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n.º 8, pp. 4712-4732, abr. 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b03755.
- [73] D. Kowalczyk y B. Baraniak, «Effects of plasticizers, pH and heating of film-forming solution on the properties of pea protein isolate films», *J. Food Eng.*, vol. 105, n.º 2, pp. 295-305, jul. 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.02.037.
- [74] Y. Shahbazi, «The properties of chitosan and gelatin films incorporated with ethanolic red grape seed extract and *Ziziphora clinopodioides* essential oil as biodegradable materials for active food packaging», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 99, pp. 746-753, jun. 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.03.065.
- [75] B. Ghanbarzadeh, H. Almasi, y A. A. Entezami, «Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films», *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 11, n.º 4, pp. 697-702, oct. 2010, doi: 10.1016/j.ifset.2010.06.001.
- [76] S. G. Kulkarni y P. Vijayanand, «Effect of extraction conditions on the quality characteristics of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* L.)», *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 43, n.º 7, pp. 1026-1031, sep. 2010, doi: 10.1016/j.lwt.2009.11.006.
- [77] S. Farris, K. M. Schaich, L. Liu, L. Piergiovanni, y K. L. Yam, «Development of polyion-complex hydrogels as an alternative approach for the production of bio-based polymers for food packaging applications: a review», *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 20, n.º 8, pp. 316-332, ago. 2009, doi: 10.1016/j.tifs.2009.04.003.
- [78] A. Nestic, S. Meseldzija, G. Cabrera-Barjas, y A. Onjia, «Novel Biocomposite Films Based on High Methoxyl Pectin Reinforced with Zeolite Y for Food Packaging Applications», *Foods*, vol. 11, n.º 3, p. 360, ene. 2022, doi: 10.3390/foods11030360.
- [79] A. Syarifuddin, M. H. Muflih, N. Izzah, U. Fadillah, A. F. Ainani, y A. Dirpan, «Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy- A review», *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 9, p. 100680, mar. 2025, doi: 10.1016/j.carpta.2025.100680.
- [80] S. Mehraj y Y. S. Sistla, «Optimization of process conditions for the development of pectin and glycerol based edible films: Statistical design of experiments», *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 55, pp. 27-39, ene. 2022, doi: 10.1016/j.ejbt.2021.11.004.
- [81] L. Cao *et al.*, «Preparation and characterization of an antioxidant edible film with soluble soybean polysaccharide and pomelo peel extract and its application in lipid packaging», *LWT*, vol. 203, p. 116434, jul. 2024, doi: 10.1016/j.lwt.2024.116434.
- [82] B. Kusznierevicz, H. Staroszczyk, E. Malinowska-Pańczyk, K. Parchem, y A. Bartoszek, «Novel ABTS-dot-blot method for the assessment of antioxidant properties of food packaging», *Food Packag. Shelf Life*, vol. 24, p. 100478, jun. 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100478.
- [83] S. Y. Reda, «Evaluation of antioxidants stability by thermal analysis and its protective effect in heated edible vegetable oil», *Ciênc. E Tecnol. Aliment.*, vol. 31, n.º 2, pp. 475-480, jun. 2011, doi: 10.1590/S0101-20612011000200030.
- [84] H. Jiang *et al.*, «Film Properties of Pectin Obtained from Various Fruits' (Lemon, Pomelo, Pitaya) Peels», *J. Compos. Sci.*, vol. 7, n.º 9, p. 366, sep. 2023, doi: 10.3390/jcs7090366.
- [85] X. Zhang *et al.*, «Structure characterization and antioxidant activity of carboxymethylated polysaccharide from *Pholiota nameko*», *J. Food Biochem.*, vol. 46, n.º 7, jul. 2022, doi: 10.1111/jfbc.14121.
- [86] L. Liu, J. F. Kerry, y J. P. Kerry, «Effect of food ingredients and selected lipids on the physical properties of extruded edible films/casings», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 41, n.º 3, pp. 295-302, mar. 2006, doi: 10.1111/j.1365-2621.2005.01063.x.
- [87] X. Hu, C. Lu, H. Tang, H. Pouri, E. Joulin, y J. Zhang, «Active Food Packaging Made of Biopolymer-Based Composites», *Materials*, vol. 16, n.º 1, p. 279, dic. 2022, doi: 10.3390/ma16010279.
- [88] J. Long, W. Zhang, M. Zhao, y C.-Q. Ruan, «The reduce of water vapor permeability of polysaccharide-based films in food packaging: A comprehensive review», *Carbohydr. Polym.*, vol. 321, p. 121267, dic. 2023, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121267.

- [89] N. B. Idahagbon, R. J. Nicholas, y A. Wei, «Pectin–cellulose nanofiber composites: Biodegradable materials for modified atmosphere packaging», *Food Hydrocoll.*, vol. 162, p. 110976, may 2025, doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110976.