



**DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA A PARTIR DE MUCÍLAGO DE CAFÉ
COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA VALORIZACIÓN DE
SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES**

Laura Natalia Páez Arenas

Jhon Alejandro Linares Fong

Alejandra Hernández Córdoba

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Ingeniería Química

Bogotá, Colombia

19/11/2025

**DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA A PARTIR DE MUCÍLAGO DE CAFÉ COMO
ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS
AGROINDUSTRIALES**

Laura Natalia Páez Arenas

Jhon Alejandro Linares Fong

Alejandra Hernández Córdoba

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Químico

Directora:

Marie José Chery Leal

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Ingeniería Química

Bogotá, Colombia

19/11/2025

Resumen

El presente trabajo aborda el desarrollo de una biopelícula polimérica a partir de mucílago de café (*Coffea arabica*), como alternativa sostenible para la valorización de subproductos agroindustriales y la reducción del uso de plásticos convencionales. La problemática ambiental generada por el incremento en la producción y desecho de plásticos de un solo uso, sumada al impacto negativo de los vertimientos de mucílago en fuentes hídricas, constituye el contexto que fundamenta esta investigación.

El objetivo general consiste en formular y evaluar una biopelícula a partir del mucílago de café, empleando metodologías de extracción y purificación, incorporando agentes filmógenos, homogenización y secado controlado. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sistemática sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago, así como ensayos experimentales orientados a optimizar la formulación y caracterizar sus propiedades.

Los resultados evidencian que el mucílago, por su contenido en polisacáridos, fibras solubles y compuestos bioactivos, posee un alto potencial para generar matrices homogéneas con buena flexibilidad, resistencia y solubilidad controlada. Se concluye que este subproducto agroindustrial representa una alternativa viable para el desarrollo de recubrimientos comestibles, contribuyendo a la economía circular, a la reducción de contaminación plástica y al fortalecimiento del sector caficultor mediante innovación sostenible.

Palabras clave: mucílago de café, biopelícula, subproductos agroindustriales, alternativa sostenible, plásticos biodegradables.

Abstract

This work addresses the development of a polymeric biofilm from coffee mucilage (*Coffea arabica*) as a sustainable alternative for valorizing agro-industrial byproducts and reducing the use of conventional plastics. The environmental problems generated by the increase in the production and disposal of single-use plastics, coupled with the negative impact of mucilage discharges into water sources, constitute the context that underpins this research.

The general objective is to formulate and evaluate a biofilm from coffee mucilage, using extraction and purification methodologies, incorporating film-forming agents, homogenization, and controlled drying. To this end, a systematic literature review was conducted on the physicochemical and functional properties of mucilage, as well as experimental tests aimed at optimizing the formulation and characterizing its properties.

Preliminary results show that coffee mucilage, due to its content of polysaccharides, soluble fibers, and bioactive compounds, has high potential for generating homogeneous matrices with good flexibility, resistance, and controlled solubility. It is concluded that this agro-industrial byproduct represents a viable alternative for the development of edible coatings, contributing to the circular economy, the reduction of plastic pollution, and the strengthening of the coffee sector through sustainable innovation.

Keywords: coffee mucilage, biofilm, agro-industrial byproducts, sustainable alternative, biodegradable plastics.

Tabla de contenido

Resumen	3
Abstract.....	4
Lista de Tablas.....	7
Lista de Figuras	8
Introducción.....	9
Objetivos	12
<i>Objetivo General</i>	<i>12</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>12</i>
Definición del problema.....	13
Justificación	15
Análisis de Requerimientos	18
<i>Verificación de Parámetros de Diseño.....</i>	<i>18</i>
<i>Estimación de características de diseño o especificaciones del producto</i>	<i>19</i>
Marco Teórico	21
<i>Café.....</i>	<i>21</i>
Cultivo de Café en el Mundo y en Colombia	21
Proceso de Beneficio del Café y Residuos Generados	22
<i>Métodos de Extracción de Pectinas</i>	<i>23</i>
Extracción Ácido-Asistida.....	24
Extracción Enzimática	24
Extracción Asistida por Microondas/ Ultrasonido.....	24
<i>Biopelículas y biopolímeros</i>	<i>24</i>
Análisis de restricciones.....	26
<i>Restricciones técnicas</i>	<i>26</i>
<i>Restricciones económicas.....</i>	<i>26</i>
<i>Restricciones normativas.....</i>	<i>27</i>
<i>Restricciones ambientales</i>	<i>27</i>
<i>Restricciones socioculturales</i>	<i>28</i>

Metodología para la selección y desarrollo de la solución	29
<i>Enfoque de la investigación.....</i>	29
<i>Alcance y tipo de investigación</i>	29
<i>Diseño de la investigación.....</i>	30
Fase 1: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer su viabilidad en la elaboración de biopelículas comestibles.	33
Fase 2: Desarrollo de una lámina de biopelícula a partir de mucílago de café mediante ensayos experimentales controlados.	34
Fase 3: Evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la biopelícula desarrollada para determinar su potencial de aplicación.	38
Resultados y análisis de resultados	40
<i>Fase 1: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer su viabilidad en la elaboración de biopelículas comestibles. ..</i>	40
<i>Fases 2 y 3: Desarrollo de una lámina de biopelícula a partir de mucílago de café mediante ensayos experimentales controlados y evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas</i>	40
Formulación 1	40
Formulación 2	45
Formulación 3	45
Análisis de costos	46
Plan de implementación.....	51
<i>Humanos.....</i>	51
<i>Técnicos</i>	52
Conclusiones	56

Lista de Tablas

Tabla 1 Parámetros de diseño para la elaboración de una biopelícula a partir de Mucílago de café.....	18
Tabla 2. Plan metodológico por fases para el desarrollo de biopelículas a partir de mucílago de café.....	32
Tabla 3. Costos directos estimados para el desarrollo experimental de la biopelícula	46
Tabla 4. Estimación de costos indirectos asociados al desarrollo experimental de la biopelícula	48
Tabla 5. Personal requerido para el escalamiento industrial	51
Tabla 6. Equipos requeridos para el escalamiento industrial	53

Lista de Figuras

Figura 1. Fases de desarrollo de la investigación	31
Figura 2. Método 1.....	35
Figura 3. Grano madurado de café	40
Figura 4. Lavado del grano de café.....	41
Figura 5. Proceso de centrifugado del extracto obtenido	41
Figura 6. Medición de pH a la mezcla del sobrenadante con el ácido cítrico.....	42
Figura 7. Mezcla final obtenida y esparcida sobre el molde.....	43
Figura 8. Biopelícula a base de mucílago de café	44

Introducción

La contaminación por plásticos constituye uno de los principales problemas ambientales de la actualidad, dado que su producción ha crecido de manera acelerada en las últimas décadas, mientras que solo una fracción muy pequeña se recicla. De acuerdo, con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, menos del 10% de los plásticos generados a nivel mundial se recupera adecuadamente (OECD, 2022). Además, se estima que el consumo mundial de estos materiales aumentará de 464 millones de toneladas en 2020 a cerca de 884 millones en 2050, lo que representa un incremento alarmante con graves implicaciones para los ecosistemas (Dokl et al., 2024). La OECD advierte que, sin la implementación de medidas más estrictas, la producción y el uso de plásticos podrían crecer hasta un 70% hacia el año 2040 (OECD, 2024). Estas proyecciones reflejan la urgencia de desarrollar alternativas sostenibles que contribuyan a mitigar el impacto ambiental derivado de estos materiales.

En este contexto, el café representa una oportunidad estratégica para Colombia, no solo por su relevancia económica y social, sino también por su potencial para impulsar el desarrollo sostenible, la innovación productiva y la diversificación de la cadena de valor a través de productos con mayor valor agregado, procesos verdes y aprovechamiento integral de sus subproductos. El país se posiciona entre los principales productores a nivel mundial, con una producción aproximada de 14 millones de sacos en 2024 (Federación Nacional de Cafeteros, 2024), y con perspectivas estables para los próximos años (USDA-FAS, 2025).

El proceso de beneficio húmedo del café genera grandes volúmenes de residuos, entre los que destaca el mucílago, una sustancia viscosa que rodea el grano. Sin embargo, la ausencia de aprovechamiento adecuado de este subproducto lo convierte en un residuo altamente

contaminante: las aguas residuales generadas durante su procesamiento pueden alcanzar valores de DBO de hasta 20.000 mg/L y DQO de 50.000 mg/L, ocasionando serios impactos sobre las fuentes hídricas cercanas (Genanaw et al., 2021; Rattan et al., 2015).

Este subproducto está compuesto principalmente por agua, azúcares, fibras y pectinas, y puede representar hasta el 22% del peso total del fruto, dependiendo de su grado de madurez (Osorio Pérez et al., 2022). Su contenido en polisacáridos y compuestos pectínicos lo convierte en una materia prima de interés para el desarrollo de recubrimientos o biopelículas con potencial funcional (Poltronieri & Rossi, 2016).

El problema radica en que, pese a ser un subproducto abundante y con propiedades funcionales valiosas, el mucílago de café aún se encuentra subutilizado en Colombia. Paralelamente, la creciente preocupación ambiental impulsa la búsqueda de materiales alternativos que puedan reducir el uso de plásticos convencionales en aplicaciones industriales y alimentarias. Diversas investigaciones han demostrado que las películas elaboradas a partir de pectinas extraídas de residuos agroindustriales presentan propiedades adecuadas de resistencia mecánica, solubilidad y capacidad de barrera, las cuales pueden optimizarse mediante la incorporación de plastificantes o compuestos activos (Syarifuddin et al., 2025; Vallejos-Jiménez et al., 2025; Biratu et al., 2024). A pesar de esto, aún existen vacíos en el conocimiento relacionados con la optimización de los procesos de obtención y la selección de los ingredientes complementarios más adecuados para el desarrollo de biopelículas con propiedades fisicoquímicas y mecánicas óptimas (Ali et al., 2025; Bojórquez-Quintal et al., 2024).

En este marco, surge la presente investigación, orientada al desarrollo de una biopelícula a partir de mucílago de café (*Coffea arabica*) como alternativa sostenible para la valorización de subproductos agroindustriales en Colombia. La pregunta de investigación que guía este estudio

es: ¿cómo desarrollar una biopelícula polimérica a partir del mucílago de café de modo que presente propiedades adecuadas para su aplicación en la industria alimentaria como alternativa sostenible para la valorización de subproductos agroindustriales?

Con el fin de responder a esta pregunta, la investigación se estructuró en tres objetivos principales: (i) Establecer las características de la materia prima, (ii) desarrollar la formulación experimental de la biopelícula, y (iii) evaluar sus propiedades mecánicas, químicas y físicas. De esta manera, se busca contribuir tanto a la valorización de un subproducto agroindustrial como al desarrollo de una alternativa potencialmente sostenible frente al uso de polímeros convencionales en la industria alimentaria.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una biopelícula a partir de mucílago de café (*Coffea arabica*) como alternativa sostenible para la valorización de subproductos agroindustriales, evaluando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas con el fin de determinar su potencial de aplicación en el sector agroindustrial.

Objetivos específicos

Analizar las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer su viabilidad y potencial como insumo base en la formulación de biopelículas comestibles.

Desarrollar una formulación de biopelícula a partir de mucílago de café, mediante ensayos experimentales que incluya la extracción y purificación del mucílago, la incorporación de agentes filmógenos, la homogenización y el secado controlado, con el propósito de obtener una matriz homogénea y funcional, apta para diversas aplicaciones. Evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la biopelícula desarrollada, considerando parámetros como dureza, homogeneidad, flexibilidad, solubilidad y resistencia, con el fin de determinar su potencial de aplicación en la industria alimentaria y otras áreas afines.

Definición del problema

La contaminación por plásticos representa una de las crisis ambientales más graves del siglo XXI. Según un informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la producción y el uso de plásticos alcanzaron los 435 millones de toneladas en 2020, y se espera que aumenten un 70 % para 2040, alcanzando niveles alarmantes. Además, los residuos plásticos mal gestionados podrían aumentar un 50 %, pasando de 81 millones de toneladas en 2020 a 119 millones en 2040 (OECD, 2022). Las proyecciones de uso global de plásticos son aún más preocupantes, se espera que crezcan de 464 a 884 millones de toneladas entre 2020 y 2050 (Dokl et al., 2024). De este volumen, únicamente un 9 % es reciclado a nivel global, lo que evidencia una gestión ineficiente y la acumulación persistente de estos materiales en ecosistemas terrestres y acuáticos (Jaynes, 2025). Esta tendencia, sumada a la baja biodegradabilidad de la mayoría de los polímeros sintéticos, ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles como los biopolímeros y recubrimientos biodegradables.

En paralelo, Colombia se posiciona como uno de los principales productores de café a nivel mundial, con una producción anual que supera los 13,5 millones de sacos de 60 kg en 2024, lo que se traduce en una producción estimada de 778,400 toneladas de mucílago, lo que equivale del 6 al 8 % del peso de la pulpa del fruto (*Federación Nacional De Cafeteros*, 2025). Este mucílago, compuesto principalmente por agua, polisacáridos, azúcares y compuestos bioactivos, es altamente perecedero y su gestión inadecuada provoca altas cargas orgánicas, que conllevan picos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) en cuerpos de agua cercanos, fomentando la eutrofización, pérdida de oxígeno disuelto y desequilibrio nutricional (Gil-Gómez et al., 2024; Montes et al., 2023). Estudios reportan valores

de DBO de hasta 20.000 mg/L y DQO de hasta 50.000 mg/L en aguas residuales de procesos de despulpado y fermentación del mucílago, cuando estas son vertidas sin tratamiento (Genanaw et al., 2021).

A pesar de que el mucílago del café posee un alto valor funcional, incluyendo pectinas, fibras solubles y antioxidantes, con aplicaciones potenciales en biopolímeros, biofertilizantes y productos alimentarios, su aprovechamiento industrial en Colombia sigue siendo limitado, representando una pérdida de recursos con potencial tanto económico como ambiental. Este panorama abre una oportunidad estratégica de transformar un residuo agroindustrial en un insumo de valor agregado que, a su vez, sustituya materiales plásticos de un solo uso.

En este sentido, el desarrollo de biopelículas poliméricas a partir de mucílago de café ofrece una solución para mitigar la contaminación de plásticos y reducir el impacto ambiental de los subproductos generados en el sector cafetero, transformándolo en un producto de alto valor agregado. No obstante, el desarrollo eficiente de este tipo de biopelículas requiere determinar no solo el potencial del mucílago como polímero base, sino también identificar el proceso más adecuado y los ingredientes complementarios que permitan obtener propiedades mecánicas y fisicoquímicas que lo hagan apto para su aplicación.

Justificación

El desarrollo de biopelículas a partir de mucílago de café dentro del contexto de la economía circular representa una alternativa para disminuir el impacto ambiental de la industria cafetera y alcanzar nuevas formas de valorización del mucílago. En la actualidad, se genera un desperdicio del 60 % de la pulpa del café y su cáscara que, si no se trata de la mejor manera, genera emisiones de gas metano, importantes para el cambio climático, y contaminación de fuentes hídricas (Del Medio Ambiente, 2023). En este contexto, el mucílago, un subproducto poco aprovechado, emerge como un recurso estratégico para su transformación en biopelículas, capaz de sustituir plásticos de un solo uso.

La necesidad de sustituir los plásticos de un solo uso por materiales biodegradables y de una base biológica es prioridad a nivel mundial. La producción de plástico supera los 8300 millones de toneladas desde la mitad del siglo XX, con más de 6300 millones de toneladas de residuos, donde el 9% se ha reciclado (Geyer, Jambeck & Law, 2017). El programa de las Naciones Unidas por el medio ambiente ha sugerido que la estrategia más viable para enfrentar dicha problemática mezcla la reducción, la reutilización y el reemplazo por biomateriales en el momento oportuno (UNEP, 2023).

Por otro lado, el mucílago de café es generado en grandes cantidades durante el beneficio húmedo y suele tratarse de un desecho de difícil manejo y gracias a su composición, se convierte en un recurso con un gran potencial para la elaboración de bioplásticos, ya que contiene moléculas con capacidad para la generación de películas y sustancias con antioxidantes (Havare et al., 2019; Shen et al., 2024).

La posibilidad de esta propuesta está respaldada por investigaciones que han demostrado la extracción de pectinas a partir de los residuos del café mediante ácidos, con resultados

positivos para la formación de películas. Además, el uso de materias primas como el glicerol mejoran la resistencia y la flexibilidad de las biopelículas, mientras que la incorporación de compuestos antioxidantes potencia sus aplicaciones en recubrimientos alimentarios (Reichembach et al., 2020; Biratu et al., 2024; Said & Lee, 2025).

La intención del desarrollo de la biopelícula a partir de mucílago de café es proponer un material alternativo y sostenible que permita aprovechar un subproducto agroindustrial de alto impacto ambiental, transformándolo en un producto de valor agregado con potencial de aplicación en la industria alimentaria y de empaques.

Desde el punto de vista técnico, el objetivo es obtener una biopelícula con propiedades adecuadas, capaz de funcionar como recubrimiento o material de envasado, reduciendo la dependencia de polímeros sintéticos derivados del petróleo. En cuanto al ámbito ambiental, el propósito es disminuir la carga contaminante asociada al proceso de beneficio húmedo del café, mitigando la generación de aguas residuales con alta DBO y DQO, y fomentando prácticas de economía circular y bioeconomía. Finalmente, en el aspecto socioeconómico, la biopelícula busca abrir nuevas oportunidades de valorización para los caficultores, diversificando las fuentes de ingreso del sector y promoviendo la innovación sostenible en la cadena de valor del café colombiano.

En conclusión, el desarrollo de biopelículas a partir de mucílago de café se encuentra plenamente justificado, pues constituye una respuesta técnica y sostenible frente a problemáticas ambientales de alcance global y local. Esta iniciativa no solo promueve la reducción del impacto derivado de los residuos agroindustriales, sino que además impulsa la diversificación económica del sector caficultor al generar valor agregado a un subproducto subutilizado. En este contexto, la bioeconomía circular representa una estrategia de alto impacto que posibilita la valorización del

mucílago de café, transformando un residuo no aprovechado en un recurso útil, promoviendo la transición hacia modelos productivos más sostenibles y ambientalmente responsables.

Análisis de Requerimientos

Verificación de Parámetros de Diseño

La biopelícula debe cumplir con una serie de requerimientos funcionales, técnicos y normativos que garanticen su aplicación en la industria alimentaria. Estos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1

Parámetros de diseño para la elaboración de una biopelícula a partir de Mucilago de café

Categoría	Requerimiento de diseño	Descripción
Seguridad y estabilidad	Inocuidad	La biopelícula debe estar libre de compuestos tóxicos y mantener estabilidad química bajo condiciones normales de almacenamiento, sin liberación de sustancias nocivas
Propiedades mecánicas	Resistencia y flexibilidad	Debe presentar suficiente resistencia a la tracción, dureza y flexibilidad, permitiendo su manipulación y aplicación como recubrimiento o lámina protectora sin fracturarse
Propiedades fisicoquímicas	Solubilidad y permeabilidad	Control de la solubilidad en agua y vapor de agua para garantizar funcionalidad.
Desempeño funcional	Compatibilidad y capacidad de barrera	La formulación debe permitir la incorporación de aditivos naturales o

		plastificantes que mejoren sus propiedades de barrera, brillo, textura o adherencia sobre distintas superficies.
Sostenibilidad	Aprovechamiento de subproductos agroindustriales	Debe elaborarse principalmente a partir de mucílago de café y aditivos de bajo impacto ambiental.
Aplicabilidad	Potencial de uso industrial	El material debe demostrar propiedades reproducibles que lo hagan viable para aplicaciones en empaques, recubrimientos o films protectores en la industria alimentaria o afines.

Nota: La tabla presenta los parámetros de diseño establecidos para orientar el desarrollo experimental de la biopelícula, asegurando la coherencia entre los objetivos del estudio, las propiedades esperadas del material y los principios de sostenibilidad del proyecto. Fuente de elaboración propia (2025)

Estimación de características de diseño o especificaciones del producto

A partir de los objetivos planteados y los requerimientos funcionales establecidos, se definieron las especificaciones iniciales que orientan el diseño experimental de la biopelícula a base de mucílago de café. Estas características permiten garantizar la reproducibilidad del proceso, la estabilidad del material y su potencial aplicación en el sector agroindustrial.

Se espera obtener un espesor entre 0,05 y 0,2 mm, el cual dependerá de la proporción de los componentes utilizados en la formulación (base, plastificante, gelificante y mucílago de café), así como de las condiciones de secado aplicadas durante el proceso de elaboración. El pH de formulación se establecerá en un rango de 2,0 a 2,5, con el fin de garantizar la estabilidad de la matriz filmógena y evitar la proliferación microbiana. En cuanto al aspecto físico, la

biopelícula deberá presentar una estructura homogénea, transparente o ligeramente opaca, sin grietas, burbujas ni defectos superficiales visibles.

Marco Teórico

Café

El café es uno de los productos agrícolas más comercializados en el mundo y constituye un pilar económico y cultural para numerosos países tropicales. Su cultivo se extiende principalmente en regiones de América Latina, África y Asia, donde las condiciones climáticas favorecen el desarrollo de las especies más utilizadas: *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Crop Trust, 2024). En Colombia, el café representa una de las principales actividades agrícolas, siendo reconocido por su calidad y su aporte al desarrollo rural, ya que genera empleo e ingresos para más de 540.000 familias cafeteras y contribuye con cerca del 15% al PIB agrícola nacional (Gómez et al., 2023; Ramírez & Castaño, 2023).

Cultivo de Café en el Mundo y en Colombia

La especie *Coffea arabica* es la predominante en Colombia y en gran parte del mundo debido a su sabor suave, su bajo contenido de cafeína y su alto valor comercial en los mercados internacionales. A nivel global, el café representa uno de los productos agrícolas más comercializados, con una producción estimada de 168,2 millones de sacos de 60kg según datos del 2022-2023, donde las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora* concentran la totalidad del cultivo comercial (Internacional Coffee Organization [ICO], 2023).

De acuerdo con datos de la *Foreign Agricultural Service* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la producción mundial de café continúa en aumento, siendo América Latina responsable de más del 50% del volumen global, especialmente por la preeminencia del café arábico cultivado en Brasil, Colombia y Perú (USDA, 2024). En el caso de Colombia, el café constituye uno de los principales productos agrícolas de exportación y una fuente esencial de empleo rural. Para el año cafetero 2023-2024, la producción nacional se

estimó en 11,6 millones de sacos de café verde lo que mantiene el país como el tercer mayor productor mundial, después de Brasil y Vietnam (USDA, 2024).

Además, el sistema productivo colombiano combina prácticas tradicionales y tecnificadas, dependiendo de la escala de producción (Solidaridad Network, 2024). Sin embargo, uno de los principales desafíos ambientales del sector está relacionado con el beneficio húmedo del café, proceso que utiliza grandes volúmenes de agua para remover la pulpa y el mucílago del grano (Rodríguez et al., 2015). Este procedimiento genera residuos con alta carga orgánica, como la pulpa, las aguas mieles y el mucílago, los cuales pueden causar contaminación si no se gestionan adecuadamente (Gómez et al., 2023).

Estos residuos, no obstante, representan una oportunidad para la innovación y la sostenibilidad, pues pueden ser aprovechados para obtener compuestos de valor agregado, como polisacáridos, antioxidantes y bioproductos útiles en las industrias alimentaria, cosmética o de biomateriales. Este enfoque promueve la transición hacia un modelo de economía circular dentro del sector cafetero, reduciendo impactos ambientales y aumentando la competitividad del producto colombiano en los mercados internacionales (Gómez et al., 2023).

Proceso de Beneficio del Café y Residuos Generados

Durante el procesamiento del fruto del café (conocido como beneficio húmedo) se remueven distintas capas del fruto mediante despulpado, fermentación y lavado. Esta técnica tradicional puede requerir hasta 40 litro de agua por kilogramo de cereza para eliminar la pulpa y el mucílago del grano (Nestlé, 2023). Además del elevado consumo hídrico, este proceso genera diversos subproductos, tales como la pulpa, la cáscara, el mucílago y las aguas mieles, que contienen altos niveles de azúcares, pectinas y otros compuestos orgánicos solubles, lo que

incrementa la demanda biológica y química de oxígeno (DBO/DQO) si se vierten sin tratamiento (Tesfaye et al., 2023).

Aprovechamiento de los Residuos del Café: Mucílago. El mucílago es una capa viscosa que recubre el grano de café tras el despulpado. Está compuesta mayoritariamente por agua (85-91%), azúcares solubles (6,2-7,4%), proteínas (4-5%) y pequeñas cantidades de pectinas (aproximadamente 1%) (Orrego et al., 2018). Esta composición lo convierte en un subproducto con alta funcionalidad, pues los polisacáridos y azúcares pueden aprovecharse para extraer pectinas o generar biopolímeros, lo cual ofrece una oportunidad para la valorización hacia la economía circular (Vallejos-Jimenez et al., 2025).

Impacto Ambiental de los Residuos del Café. La disposición inadecuada del mucílago y otros residuos del café produce una alta carga orgánica en cuerpos de agua, aumentando la DBO y la DQO, lo cual genera pérdida de oxígeno disuelto y deterioro de ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, los residuos del beneficio húmedo han presentado DBO superiores a 20.000mg/L en aguas de descarte, lo que evidencia su severo impacto ambiental (Gidabo Study, 2024). Este contexto refuerza la necesidad de implementar estrategias de valorización de subproductos para mitigar efectos negativos y transformar residuos en insumos de valor.

Métodos de Extracción de Pectinas

Las pectinas extraídas del mucílago del café son polisacáridos de gran interés por sus propiedades gelificantes y filmógenas. Los principales métodos de extracción reportados en la literatura incluyen:

Extracción Ácido-Asistida

Este método usa ácidos diluidos (por ejemplo, ácido cítrico a pH de 1.8) a temperaturas elevadas (80-90°C) durante 45-60 minutos para hidrolizar la matriz y liberar pectinas. En un estudio sobre mucílago y pulpa de café arábica, se obtuvieron rendimientos de pectina de 10,98% (mucílago) y 6,14% (pulpa) usando ácido cítrico de 1M a 80°C por 45 minutos (Vallejo-Jiménez et al., 2025). A pesar de su eficiencia, este método puede provocar degradación del peso molecular si las condiciones son muy severas.

Extracción Enzimática

La extracción enzimática emplea enzimas pectinasas o celulasas que actúan bajo condiciones más suaves (pH de 4,5 – 5,5, temperatura de 40-50°C y un tiempo de 1- 4 horas). Este proceso produce pectinas de mayor pureza, reduciendo degradación estructural, aunque con menor velocidad y mayor coste (Fitri et al., 2021).

Extracción Asistida por Microondas/ Ultrasonido

Los métodos verdes de extracción utilizan microondas, ultrasonidos o campos eléctricos pulsados como pretratamiento para mejorar la liberación de compuestos bioactivos, incluidas las pectinas, en menor tiempo y con menor consumo de solventes. En un estudio con residuos de café se logró aumentar el rendimiento de extracción de compuestos fenólicos mediante combinación de microondas y campo eléctrico pulsado (MAE+PEF) (Melo-Mendoza et al., 2023).

Biopelículas y biopolímeros

Las pectinas y compuestos fenólicos obtenidos del mucílago del café se han empleado en la formulación de biopelículas y biopolímeros biodegradables (Said & Lee, 2025). Estos materiales actúan como recubrimientos o matrices que pueden funcionar como barreras frente a

gases y humedad, ofreciendo aplicaciones en los sectores alimentario, farmacéutico y de empaques sostenibles. Los biopolímeros son macromoléculas de origen natural (como polisacáridos, proteínas y lípidos) capaces de formar películas biodegradables y flexibles (Tarique et al., 2021).

Adicionalmente, el mucílago del café es una materia prima especialmente atractiva para este fin debido a su alto contenido de polisacáridos (pectinas, celulosas y hemicelulosas) y compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes, que mejoran estabilidad y resistencia de las biopelículas (Reichembach et al., 2020). Esto es respaldado por estudios recientes que han evidenciado que las moléculas antioxidantes del mucílago contribuyen a reducir la oxidación y el deterioro del material, aumentando su vida útil en comparación con otros biopolímeros naturales (Shen et al., 2024). Su disponibilidad como subproducto del proceso de beneficio húmedo permite valorizar este residuo orgánico abundante, reduciendo la carga contaminante y contribuyendo al enfoque de economía circular dentro del sector cafetero (Biratu et al., 2024). De este modo, el aprovechamiento del mucílago no solo permite desarrollar materiales biodegradables con propiedades funcionales competitivas, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental y económica en las zonas productoras de café, ofreciendo una alternativa innovadora y de bajo impacto ambiental frente a los polímeros derivados del petróleo (Mohan et al., 2025).

Análisis de restricciones

Restricciones técnicas

La implementación del proyecto de biopelículas a partir de mucílago de café enfrenta limitaciones técnicas clave ligadas a la variabilidad intrínseca de este residuo agroindustrial. Dado que su composición, en términos de pectinas, azúcares solubles y humedad, depende de factores como la variedad de café, zonas de cultivo, clima y condiciones de beneficio, el rendimiento de extracción puede fluctuar significativamente, lo que repercute en las propiedades mecánicas y funcionales de la película resultante (Reichembach et al., 2020). Además, para que dichas biopelículas sean competitivas frente a empaques convencionales, deben cumplir con parámetros industriales estandarizados como la resistencia a la tracción (ASTM D882), permeabilidad de vapor de agua (ASTM E96) y permeabilidad al oxígeno (ASTM D3985) (ASTM International, 2023).

Restricciones económicas

La economía del proyecto constituye otra clase de restricción determinante. Aunque el aprovechamiento del mucílago transforma un residuo en materia prima, los costos iniciales de extracción, tratamiento, secado y pruebas de laboratorio pueden resultar elevados frente a los plásticos convencionales. El uso de reactivos, energía térmica, equipos de secado y la certificación de materiales incrementan los costos unitarios, lo que puede afectar la competitividad si se produce a pequeña escala (Mohan et al., 2025). Asimismo, el cumplimiento de normativas de compostabilidad, como la ASTM D6400, EN 13432 o la NTC ISO 17088:2023, implica ensayos de laboratorio y auditorías adicionales que elevan la inversión requerida (ICONTEC, 2023). Sin embargo, es importante considerar que en Colombia la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 0803 de 2024 estimulan la sustitución de plásticos de un solo uso,

lo cual abre una ventana de mercado interesante para biopelículas biobasadas, aunque dependerá de la capacidad del proyecto para asumir el riesgo inicial (MinAmbiente, 2024).

Restricciones normativas

Desde el punto de vista regulatorio, el desarrollo e implementación de biopelículas comestibles o de contacto alimentario exige cumplir con una serie de normas que pueden limitar el proceso. En Colombia, por ejemplo, la Resolución 4143 de 2012 del INVIMA fija límites de migración total y específica para envases en contacto con alimentos (por ejemplo, 50 mg/kg o 8mg/dm² en ciertos alimentos para lactantes), y la Resolución 2674 de 2013 exige la adopción de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) durante la producción (INVIMA, 2012; INVIMA 2013). A nivel internacional, el Reglamento (UE) No 10/2011 y el Reglamento (CE) No 1935/2004 delimitan los requisitos de los materiales de envasado con alimentos, y en los Estados Unidos, la inclusión de nuevos materiales requiere una Food Contact Notification (21 CFR 170.100-106) incluso cuando las sustancias están reconocidas como GRAS (por ejemplo, pectina bajo 21 CFR 184.1588) (U.S. FDA, 2023).

Restricciones ambientales

El proyecto de biopelículas hecho a partir del mucílago de café ofrece ventajas ambientales importantes, por ejemplo, la valorización de un residuo que de otro modo se desecharía, pero no está libre de retos ecológicos. El consumo de agua y energía, el uso de reactivos químicos y la generación de residuos secundarios durante la extracción del mucílago pueden implicar una huella ambiental que debe ser gestionada adecuadamente (Li et al., 2025). Además, la ubicación de la planta de tratamiento debe alinearse con los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y cumplir con licencias de vertimiento y manejo de residuos impuestas por la autoridad ambiental regional (ANLA, 2024). Así, la ingeniería debe asegurar que el proceso sea

coherente con la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia, minimizando impactos como emisiones de CO₂, efluentes o residuos sólidos, lo cual puede requerir inversión adicional o tecnologías más limpias (MinAmbiente, 2022).

Restricciones socioculturales

La dimensión sociocultural del proyecto no debe subestimarse. Para que una biopelícula derivada de mucílago sea aceptada en el mercado es necesario que tanto la industria alimentaria como los consumidores reconozcan su inocuidad, funcionalidad y valor añadido ambiental. Cambios de hábito, percepción de “plástico biodegradable” versus “plástico convencional”, y la disposición a pagar un posible sobrecoste pueden influir en la demanda (Gómez et al., 2023). En las zonas cafeteras, la participación de los productores y su capacitación en las nuevas cadenas productivas (para garantizar calidad, trazabilidad y mejora continua) es crucial para que el proyecto contribuya al desarrollo rural y no sea percibido como una carga adicional.

Metodología para la selección y desarrollo de la solución

Enfoque de la investigación

El presente estudio se plantea bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recopilación, tratamiento y análisis de datos medibles que permiten evaluar con precisión la viabilidad del mucílago de café como insumo para la elaboración de biopelículas comestibles.

En este sentido, dicho enfoque se implementa mediante la aplicación de pruebas fisicoquímicas a las formulaciones desarrolladas en laboratorio, cuyos resultados se expresarán en valores numéricos que facilitarán la comparación objetiva con parámetros de referencia bibliográfica, en los que se incluyen propiedades como el espesor, el pH y resistencia mecánica, los cuales, son fundamentales para determinar la calidad, funcionalidad y sostenibilidad del biopolímero propuesto.

Alcance y tipo de investigación

Este estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar una biopelícula comestible y biodegradable a partir de mucílago de café, clasificándose como una investigación descriptiva de tipo experimental, dado que busca delinear propiedades específicas del material, así como determinar sus características funcionales y de desempeño en aplicaciones alimentarias. Con este enfoque, no solo se pretende obtener una descripción detallada de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas y de la biopelícula, sino también comprobar su viabilidad como alternativa sostenible frente a los plásticos de un solo uso en el sector alimentario.

En este orden de ideas, se reconocen los principales desafíos asociados a la valorización del mucílago de café como subproducto agroindustrial, entre ellos su aprovechamiento eficiente, la estandarización de procesos de extracción y la optimización de aditivos naturales que garanticen inocuidad, resistencia y estabilidad del material. La investigación busca generar

insumos técnicos y científicos que contribuyan a la innovación en biopolímeros, beneficiando tanto al sector cafetero mediante la revalorización de residuos como a la industria alimentaria en su transición hacia materiales más sostenibles. Para responder a estos retos y garantizar resultados confiables, es necesario adoptar metodologías integradas que combinen a experimentación controlada con el análisis descriptivo de las propiedades del material.

Diseño de la investigación

El diseño metodológico de este estudio se fundamenta en la integración de un componente documental y un componente experimental, con el fin de garantizar que el desarrollo de la biopelícula comestible a partir de mucílago de café se sustente tanto en la evidencia científica existente como en resultados de laboratorio confiables. En este sentido, la investigación se estructura de manera progresiva, iniciando con la recopilación y análisis de información disponible, para luego avanzar a la formulación de prototipos y finalmente a la evaluación de sus propiedades.

Considerando lo expuesto, el desarrollo de la investigación se estructuró en tres etapas principales, las cuales se presentan de manera esquemática en la Figura 1.

Figura 1.*Fases de desarrollo de la investigación*

Nota: Proceso metodológico propuesto para el desarrollo y evaluación de la biopelícula a partir de mucílago de café. Fuente de elaboración propia (2025)

Para recopilar y analizar la información, orientada al cumplimiento de los objetivos de la investigación, se combinaron métodos documentales, experimentales y analíticos con el propósito de garantizar tanto la validez científica como la rigurosidad técnica del estudio.

En primera medida, se consideraron técnicas documentales como punto de partida, orientadas principalmente a revisar y sistematizar información científica y técnica disponible sobre el mucílago de café y las metodologías de extracción de dicha materia prima. De igual manera, se implementaron métodos experimentales, con el fin de transformar el conocimiento recopilado en la fase documental en propuestas concretas de formulación y elaboración del prototipo. Finalmente, las técnicas de análisis e instrumentación se orientaron a la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de la biopelícula obtenida.

De esta manera, la investigación articula tres etapas fundamentales que se integran de manera progresiva y complementaria, aportando herramientas precisas para avanzar desde la construcción teórica hasta la validación de resultados. Estos aspectos se abordan de manera más detallada en la Tabla 2.

Tabla 2.

Plan metodológico por fases para el desarrollo de biopelículas a partir de mucílago de café

Fase	Metodología	Recursos requeridos
Fase 1: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer la viabilidad de su aplicación en la elaboración de biopelículas comestibles.	Búsqueda en base de datos: Scopus, Web of Science, PubMed y Google Scholar. Selección de estudios por títulos/resúmenes y lectura completa. Extracción de datos: composición fisicoquímica, métodos de extracción y propiedades funcionales. Síntesis cualitativa del contenido extraído de las fuentes bibliográficas.	Acceso a bases de datos científicas. Gestor de referencias (Mendeley, EndNote).
Fase 2: Desarrollo de una lámina comestible y biodegradable a partir de mucílago de café mediante ensayos experimentales controlados.	Recolección y pretratamiento del mucílago (lavado, tamizado, secado parcial). Extracción y purificación: extracción acuosa, filtración y/o centrifugación. Caracterización preliminar del extracto (pH, viscosidad, contenido de azúcares) y selección de agentes filmógenos. Ensayos de formación de láminas: vertido (casting) en moldes, secado controlado (temperatura y humedad), y prueba de distintas concentraciones/proporciones. Optimización iterativa: evaluar apariencia, homogeneidad, flexibilidad y manejo; ajustando formulación y proceso.	Materia prima: mucílago de café fresco o seco. Reactivos y aditivos: glicerol, almidón, sales y conservantes naturales. Equipos: balanza analítica, agitador magnético, moldes para casting, plancha de calentamiento, beakers, dinamómetro y medidor de pH.

Fase 3:	Medición de propiedades mecánicas:	Instrumental:	dinamómetro,
Evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la biopelícula desarrollada para determinar su potencial de aplicación.	ensayo de flexibilidad, dureza y resistencia.	micrómetro, medidor de pH, refractómetro y espectrofotómetro	
	Medición de propiedades químicas/estructurales: contenido de humedad, pH y contenido de azúcares.		

Nota: La tabla organiza el proyecto en tres fases con sus objetivos, metodologías y recursos. Este esquema integra la revisión bibliográfica, el desarrollo experimental y la evaluación de propiedades para validar el potencial del mucílago de café en biopelículas comestibles y biodegradables. Fuente: Elaboración propia (2025)

Fase 1: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer su viabilidad en la elaboración de biopelículas comestibles.

Para la caracterización documental y analítica del mucílago de café, se estableció como estrategia inicial la búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos como *Scopus*, *Web of Science* y *ScienceDirect*, complementada con repositorios de libre acceso y revistas especializadas en alimentos funcionales y valorización de subproductos agrícolas. Esta exploración se orientó hacia los artículos publicados en los últimos 10 años, priorizando investigaciones que información cuantitativa, metodologías reproducibles y análisis experimentales de referencia.

La búsqueda se estructuró mediante combinaciones de términos clave como “*coffee mucilage*”, “mucílago de café”, “*coffee by-products*”, “*pectin extraction*”, “*edible film*” o “*biopolymer characterization*”. De este modo, se abarcaron desde los estudios que describen la composición química del mucílago (carbohidratos, pectinas, proteínas, cenizas, lípidos y azúcares reductores) hasta los que detallan sus propiedades funcionales (viscosidad, capacidad gelificante, solubilidad, peso molecular de los polisacáridos, entre otras). Además, se dió

especial énfasis a los reportes que describen los parámetros operativos empleados en la extracción y purificación del mucílago, tales como temperatura, pH, tiempo de reacción, relación sólido-líquido y técnicas de separación como centrifugación, filtración o liofilización, dado que estos factores influyen directamente en la calidad del material recuperado.

Una vez identificada la literatura, se realizó un proceso de selección sistemático donde se excluyeron artículos que carecen de detalle metodológico o que no ofrecen resultados cuantitativos. A partir de cada estudio seleccionado, se sistematizaron datos clave como el tipo de muestra utilizada (mucílago fresco, seco o combinado con pulpa), los métodos de extracción aplicados, las condiciones experimentales (temperatura, tiempo, pH, agitación, centrifugación) y los rendimientos obtenidos. De igual manera, se recopilaron análisis fisicoquímicos como el contenido de humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos totales y pectinas que ponen en evidencia el potencial del mucílago de café en formulaciones de biopelículas.

Fase 2: Desarrollo de una lámina de biopelícula a partir de mucílago de café mediante ensayos experimentales controlados.

En primer lugar, se realizó la recolección del mucílago fresco directamente de procesos de beneficio húmedo del café, asegurando que provenía de cerezas maduras. El material recolectado fue almacenado en recipientes limpios y transportado en condiciones controladas de temperatura (aprox. 4 °C) para evitar fermentaciones indeseadas que alteraran su composición química y funcional (Biratu et al., 2024).

Posteriormente, el material obtenido fue sometido a un proceso de filtración con el fin de mejorar su homogeneidad y retirar partículas de mayor tamaño. Es importante destacar que, aunque en etapas preliminares se evaluó la aplicación de tratamientos como la hidrólisis ácida, en el diseño final se optó por emplear el mucílago sin modificaciones químicas, con el propósito

de conservar sus propiedades naturales, especialmente su contenido de polisacáridos, relevantes para la formación de películas.

Una vez acondicionado, el mucílago fue llevado a un proceso de secado controlado para reducir su contenido de humedad y favorecer su estabilidad. Posteriormente, el material seco fue sometido a molienda hasta obtener un polvo fino, lo que permitió facilitar su dosificación e incorporación en las formulaciones filmogénicas. Finalmente, el producto obtenido se almacenó en condiciones adecuadas, evitando la exposición a la humedad y contaminantes, hasta su utilización en las etapas experimentales.

Este procedimiento fue definido como el método base dentro del diseño experimental, debido a su simplicidad, reproducibilidad y capacidad de preservar las características funcionales del mucílago, necesarias para evaluar su viabilidad en la elaboración de biopelículas comestibles. Esta metodología se puede evidenciar de manera esquemática en la Figura 2.

Figura 2.

Método 1.

MÉTODO FINAL



Nota: El diagrama describe el método de extracción del mucílago de café, que comprende las etapas de recolección, lavado y filtración, seguidas de la acidificación controlada, calentamiento para obtener el biopolímero. Fuente de elaboración propia (2025)

Pretratamiento:

- Lavado del mucílago con agua destilada en una proporción de 1:3 (sólido:líquido), utilizando un agitador magnético o mecánico a 300rpm durante 10 minutos.

- Filtración del mucílago lavado usando un tamiz de 0,5 mm para eliminar partículas sólidas gruesas.

Obtención de la Solución Filmógena. Para la formulación de la solución filmógena o casting, se toma la solución de mucílago. Posterior a esto, se incorpora glicerina como plastificante en proporciones del 20–40 % respecto a la masa seca de polisacárido, lo que mejora flexibilidad y propiedades de barrera. Finalmente, la mezcla se calienta a 50–70 °C y se homogeniza bajo agitación controlada a 300 rpm, durante 15 min, obteniendo así una solución uniforme y estable que servirá como base para la formación de las biopelículas (Machado & de Oliveira, 2023). Para un mejor entendimiento se presenta de forma esquemática el procedimiento en la Figura 3.

Figura 3.

Procedimiento para la obtención de la solución filmógena



Nota: El diagrama describe el procedimiento para la obtención de la solución filmógena a partir de mucílago de café, que consiste en la preparación de dispersiones acuosas, incorporación de glicerol como plastificante, calentamiento controlado y agitación constante para favorecer la homogeneización y formación de la matriz polimérica. Fuente de elaboración propia (2025).

Fase 3: Evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la biopelícula desarrollada para determinar su potencial de aplicación.

En esta fase se busca determinar la viabilidad del film elaborado a partir de mucílago de café mediante la caracterización de sus propiedades. La evaluación inicia con los parámetros físicos, que comprenden la medición de la solubilidad y homogeneidad del material. La solubilidad observando su comportamiento en largos periodos de tiempo sumergida bajo el agua, verificando al mismo tiempo su homogeneidad evitando la formación de burbujas o grietas en la película.

Posteriormente, se determina el contenido de humedad mediante el método gravimétrico, pesando las muestras antes y después del secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante, lo cual permite conocer la cantidad de agua retenida en la matriz polimérica.

Finalmente, en la prueba de evaluación se analizan las propiedades mecánicas de la biopelícula. Para el análisis de flexibilidad, las películas se cortan en tiras de dimensiones estándar (aprox. 10 × 100 mm) y se someten a pruebas manuales de doblado repetido, registrando el número de ciclos antes de la aparición de grietas o rupturas visibles. Adicionalmente, la elongación se puede estimar utilizando un montaje simple con soportes y cargas colgantes, donde se mide el alargamiento de la película bajo el peso progresivo de masas conocidas.

1. Evaluación del producto final:

- Medir el grosor de la biopelícula utilizando un micrómetro digital o calibrador.
- Probar la resistencia mecánica de la biopelícula con ensayos manuales comparativos de tensión.
- Evaluar la flexibilidad doblando manualmente la biopelícula varias veces hasta que se rompan.

- Observar visualmente la homogeneidad, verificando la ausencia de burbujas, grietas o diferencias de color.

Resultados y análisis de resultados

Fase 1: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del mucílago de café para establecer su viabilidad en la elaboración de biopelículas comestibles.

A partir de los análisis realizados, se evidenció que el mucílago de café presenta características adecuadas para la formación de biopelículas. Se observó que tiene buena capacidad para formar películas continuas, lo cual está relacionado con su contenido de polisacáridos. Además, su comportamiento frente al agua permitió una adecuada interacción con los demás componentes de la formulación. Las biopelículas obtenidas mostraron buena flexibilidad, cohesión y una superficie más homogénea, junto con una resistencia mecánica aceptable. En general, los resultados indican que el mucílago de café puede considerarse una alternativa viable para la elaboración de biopelículas comestibles.

Fases 2 y 3: Desarrollo de una lámina de biopelícula a partir de mucílago de café mediante ensayos experimentales controlados y evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas

Durante la fase experimental se desarrollaron tres formulaciones con el fin de evaluar el comportamiento del mucílago de café en la elaboración de biopelículas y determinar las condiciones más adecuadas para obtener una matriz homogénea y funcional.

Formulación 1

La materia prima empleada corresponde a grano madurado de café que se muestra en la *figura 4*. Durante la etapa de preparación se lavó el material con agua destilada con el fin de eliminar impurezas y residuos de pulpa según se muestra en la Figura 5.

Figura 3.

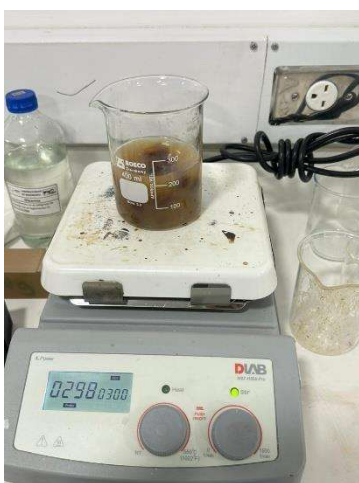
Grano madurado de café



Nota. Imagen tomada por los autores (2025).

Figura 4.

Lavado del grano de café

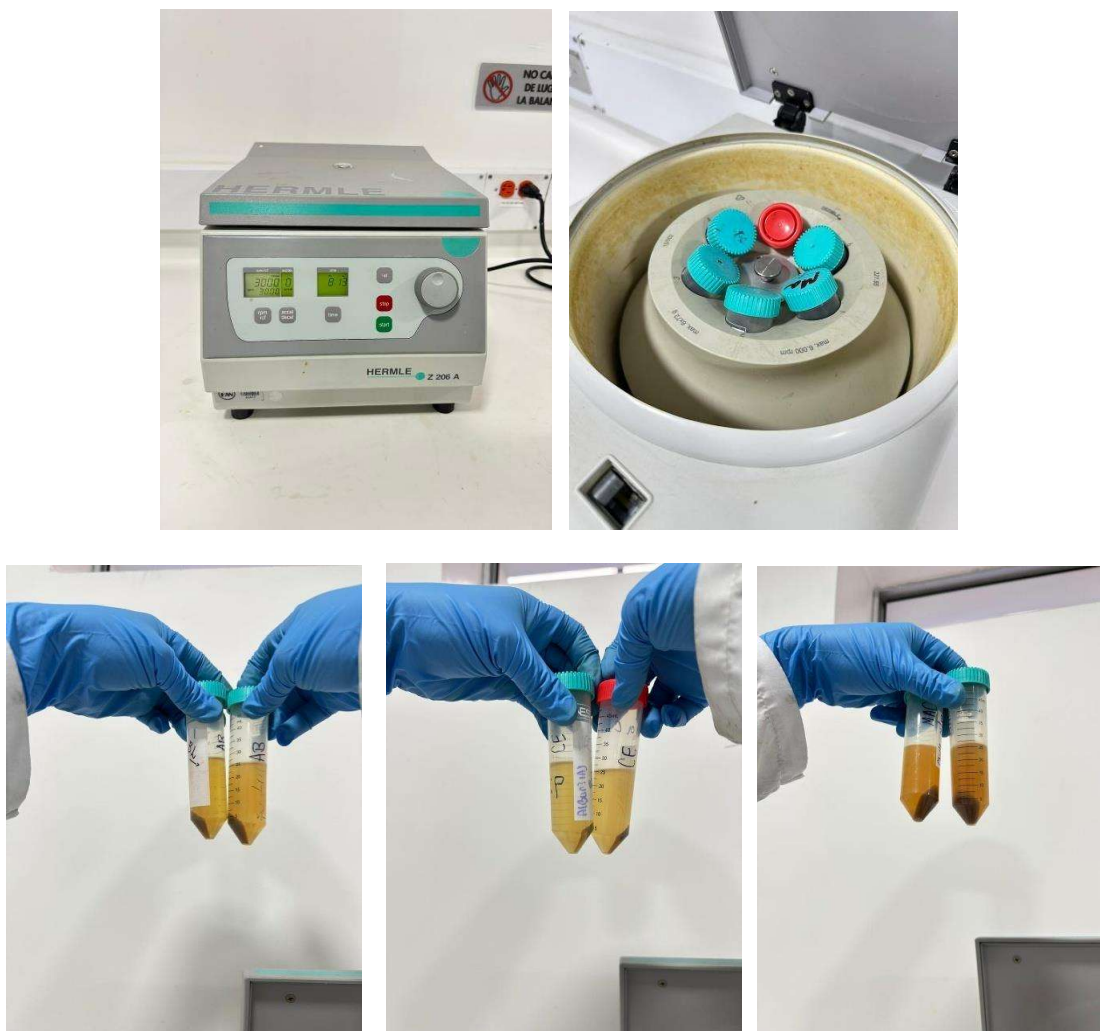


Nota. Imagen tomada por los autores, (2025).

Posteriormente, el extracto obtenido se sometió a un proceso de centrifugación a 3000rpm durante 15 minutos, con el propósito de separar partículas sólidas y obtener una fase líquida más clara y homogénea (ver Figura 6).

Figura 5.

Proceso de centrifugado del extracto obtenido



Nota. Imágenes tomadas por los autores, (2025).

Una vez recuperado el sobrenadante, se adicionó una solución de ácido cítrico hasta ajustar el pH entre 2 y 3, lo que permitió estabilizar la matriz y favorecer la disponibilidad de los polisacáridos filmógenos presentes en el mucílago (ver Figura 7).

Figura 6.

Medición de pH a la mezcla del sobrenadante con el ácido cítrico



Nota. Imagen tomada por los autores, (2025).

Después de esta etapa de acondicionamiento, se procedió a la incorporación de los agentes formadores de la biopelícula, adicionando 30 g de glicerina y 30 g de almidón a 100 mL de mucílago lavado y acidificado. La mezcla se mantuvo bajo agitación constante a 250 rpm y calentamiento controlado a 60 °C, con el fin de lograr una dispersión homogénea y completa integración de los componentes.

Una vez obtenida la solución filmógena estable, se vertió en moldes planos, lo que permitió obtener una superficie final lisa y uniforme, evidenciando buena distribución de los componentes y adherencia controlada. El resultado se muestra en la Figura 8.

Figura 7.

Mezcla final obtenida y esparcida sobre el molde



Nota. Imágenes tomadas por los autores, (2025).

El secado se realizó a temperatura ambiente, para evitar la formación de grietas o deformaciones por evaporación rápida del solvente. Se logró una película visualmente lisa, pero con baja cohesión mecánica y tendencia al quiebre, indicando que la hidrólisis ácida no proporcionó la estructura continua esperada (Ver figura 9).

Figura 8.

Biopelícula a base de mucílago de café



Nota. Imágenes tomadas por los autores, (2025).

Debido a que la película obtenida mostró baja cohesión y tendencia al quiebre, se revisaron alternativas, encontrándose en la literatura varios autores reportan una mayor estabilidad cuando se combinan matrices polisacáridicas con proteínas gelificantes y plastificantes de baja volatilidad, se decidió cambiar el método para los intentos posteriores. Gómez-Guillén et al. (2009) destacan que la gelatina mejora significativamente la cohesión, elasticidad y resistencia de películas biodegradables al formar redes tridimensionales más estables. De igual manera, Vieira et al. (2011) señalan que plastificantes como el propilenglicol presentan menor volatilidad y mejor capacidad humectante que la glicerina, lo que reduce la aparición de grietas y mejora la flexibilidad de las biopelículas. Con base en estas recomendaciones, se abandonó el método por hidrólisis ácida y se optó por emplear el mucílago de café directamente para las formulaciones siguientes.

Formulación 2

En el segundo intento se preparó una mezcla base de 10 g de mucílago con 15 mL de agua y 4 g de almidón de maíz. Paralelamente, se hidrataron 3 g de gelatina sin sabor en 24 mL de agua y se calentaron a 60 °C hasta su completa disolución. Tras dejarla enfriar ligeramente, la mezcla de mucílago, agua y almidón se incorporó a la gelatina, obteniéndose una matriz más densa y cohesiva. Esta preparación se llevó a 70 °C para favorecer la interacción entre polisacáridos y proteínas, y posteriormente se añadieron 5 mL de propilenglicol como plastificante, junto con 0,5 mL de ácido cítrico y 0,5 mL de ácido acético para ajustar la acidez y estabilizar la estructura. Este nuevo método permitió obtener una biopelícula con mayor flexibilidad, uniformidad y resistencia, superando ampliamente los resultados del primer intento.

Formulación 3

En el tercer intento se mantuvo el mismo procedimiento y las mismas cantidades de la segunda formulación, pero se incorporó un pretratamiento térmico al mucílago mediante tostado antes de la mezcla. Este proceso modificó el color, aroma y propiedades mecánicas del material al reducir parte de sus compuestos hidrofílicos y aumentar la rigidez de la matriz. Aunque la película final conservó la integridad general lograda en el segundo intento, presentó menor elasticidad y una textura más rígida, lo que permitió comparar directamente el efecto del tostado sobre la formación de la biopelícula y sus propiedades funcionales.

La biopelícula evaluada mostró un desempeño favorable en todas las pruebas realizadas. Presentó una buena solubilidad en agua, manteniendo su integridad tras 24 horas de inmersión. El espesor, medido con un pie de rey, fue de 0,91 cm, evidenciando una formación uniforme. En la prueba de resistencia a la tensión, soportó hasta 28 g antes de rasgarse, mostrando un comportamiento mecánico aceptable para biopelículas artesanales. Su flexibilidad fue notable, ya que pudo doblarse repetidamente sin romperse. Finalmente, la homogeneidad de la superficie mejoró respecto a ensayos previos, obteniéndose una estructura más continua y sin imperfecciones visibles.

Los resultados evidencian que la formulación de biopelículas a partir de mucílago de café depende significativamente de la interacción entre sus componentes estructurales. Mientras que el mucílago por sí solo presenta capacidad filmógena, su desempeño mecánico es limitado sin modificación. La incorporación de gelatina y propilenglicol permitió la formación de una red polimérica más estable, mejorando propiedades como flexibilidad, resistencia y cohesión. Por otro lado, el tratamiento térmico previo (tostado) generó una matriz más rígida, lo que demuestra la sensibilidad del material a cambios en su composición química. En conjunto, estos resultados

posicionan al mucílago de café como una materia prima prometedora para el desarrollo de biopelículas comestibles, siempre que se optimicen las condiciones de formulación.

Análisis de costos

El análisis de costos constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo experimental, ya que permite estimar los recursos económicos necesarios para la formulación, caracterización y evaluación de la biopelícula a partir de mucílago de café. En este sentido, a continuación, se presenta el desglose de los costos directos e indirectos asociados al proceso experimental, con el propósito de identificar los principales componentes económicos involucrados y evaluar la viabilidad del proyecto en condiciones de laboratorio.

Tabla 3.

Costos directos estimados para el desarrollo experimental de la biopelícula

Costos directos			
Categoría	Elemento	Cantidad	Costo unitario
Insumos de formulación	Mucilago de café	1000 g	\$ 25.000,00
	Gelatina sin sabor	30 g	\$ 3.200,00
	Almidón de yuca	250 g	\$ 8.000,00
	Almidón de maíz	250 g	\$ 8.000,00
	Glicerol	500 ml	\$ 15.000,00
	Propilenglicol	500 ml	\$ 25.000,00
	Ácido acético	250 ml	\$ 10.000,00
	Ácido cítrico	250 g	\$ 10.000,00
Suministros de laboratorio	Papel filtro	10	\$ 0,00
	Beakers y utensilios menores	3	\$ 0,00
Uso de equipos	Balanza analítica	1	\$ 0,00
	Plancha de calentamiento y agitador magnético	2	\$ 0,00
Total estimado de costos directos			\$ 104.200,00

Nota: Los valores presentados en la tabla corresponden a una estimación de costos directos asociados a la fase experimental del desarrollo de la biopelícula a partir de mucílago de café. Los

precios de los insumos fueron obtenidos a partir de cotizaciones de referencia del mercado local en 2025. Fuente de elaboración propia (2025).

Cabe recalcar que se estima que los precios pueden disminuir significativamente si se incrementan las cantidades de compra y se adquieren los insumos al por mayor, especialmente en el caso de materias primas como el almidón de yuca, la glicerina y el ácido cítrico, cuyos proveedores ofrecen descuentos por volumen.

Los costos directos comprenden todos los gastos asociados de manera inmediata y tangible con la elaboración experimental de la biopelícula. En este caso, incluyen los insumos, materias primas y el uso de equipos e instrumentos de laboratorio requeridos para el proceso de formulación, caracterización y evaluación del material.

Dentro de los insumos de formulación, el mucílago de café representa la materia prima base del proceso, con un costo estimado de \$25.000 por kilogramo, correspondiente a su recolección, filtrado y acondicionamiento. El almidón de yuca, ácido cítrico y glicerina complementan la formulación, actuando respectivamente como agente gelificante, regulador de pH y plastificante, indispensables para otorgar a la biopelícula sus propiedades mecánicas y de estabilidad. En conjunto, estos insumos suman un costo total aproximado de \$105.000 COP, lo cual representa una inversión accesible para experimentación a escala de laboratorio.

En cuanto a los suministros de laboratorio (papel filtro, beakers y utensilios menores), así como el uso de equipos (balanza analítica, plancha de calentamiento, agitador magnético, centrífuga y bomba de vacío) y los instrumentos de análisis (micrómetro y medidor de pH), no se asigna costo económico directo debido a que son recursos provistos por la universidad. Sin embargo, su utilización implica un valor técnico agregado al proyecto, ya que garantizan la precisión experimental y la reproducibilidad de los resultados.

En síntesis, el costo directo estimado total para el desarrollo experimental del material asciende a \$104.200 COP, evidenciando la viabilidad económica y sostenibilidad técnica del proyecto en condiciones de laboratorio.

Tabla 4.

Estimación de costos indirectos asociados al desarrollo experimental de la biopelícula

Costos indirectos				
Categoría	Elemento	Cantidad/unidad	Costo estimado (COP)	Descripción
Energía eléctrica	Consumo de equipos (plancha de calentamiento, agitador magnético)	10 kWh aprox.	\$ 15,000.00	Estimado con base en el uso continuo de equipos durante la fase experimental
Agua	Lavado de materiales y limpieza del área de trabajo	20 L aprox.	\$ 5,000.00	Uso de agua para procesos de limpieza y acondicionamiento del mucilago
Permisos y normativas	Registro o certificación INVIMA	1 trámite	\$ -	No se considera en esta fase, al tratarse de un desarrollo experimental
Total estimado de costos indirectos			\$ 20,000.00	

Nota: Los valores presentados corresponden a una estimación de los costos indirectos asociados al desarrollo experimental en condiciones controladas de laboratorio. Fuente de elaboración propia (2025).

Entre los principales rubros se destacan el consumo de energía eléctrica, estimado en 10 kWh con un costo aproximado de \$15.000 COP, correspondiente al uso continuo de equipos como la plancha de calentamiento, el agitador magnético y la centrífuga. Este gasto refleja el requerimiento energético asociado a la homogenización, secado y pruebas experimentales de la biopelícula.

El consumo de agua se calculó en 20 litros, con un valor de \$5.000 COP, empleado en el lavado de materiales, utensilios y la limpieza general del área de trabajo, así como en el

acondicionamiento del mucílago antes de su procesamiento. Estos valores son representativos de una escala de laboratorio, donde las cantidades empleadas son moderadas y controladas.

En cuanto al rubro de permisos y normativas, se incluye el registro o certificación del INVIMA con un valor de \$0 COP. Esta decisión se justifica porque el proyecto se encuentra en una fase experimental y académica, orientada a la validación científica del proceso y no a la comercialización o distribución del producto final.

El Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) exige registro sanitario únicamente para productos que van a ser puestos en el mercado o consumidos por el público. En esta etapa, el desarrollo se realiza con fines investigativos y de validación técnica, bajo un entorno controlado de laboratorio y sin contacto con consumidores finales. Por tanto, el coste asociado al trámite INVIMA no aplica en la presente fase, aunque deberá considerarse en etapas posteriores de escalamiento industrial, validación tecnológica o transferencia de resultados, cuando se evalúe la factibilidad comercial del recubrimiento desarrollado.

El total estimado de costos indirectos asciende a \$20.000 COP, lo cual demuestra que el proyecto mantiene un perfil económicamente viable y sostenible, con una infraestructura básica de laboratorio y recursos de bajo costo. Este nivel de inversión es apropiado para proyectos de investigación aplicada, especialmente en etapas iniciales donde el objetivo principal es la optimización de formulaciones y la evaluación de propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

Plan de implementación

Humanos

La tabla 5 presenta el personal requerido para el escalamiento industrial muestra una estructura organizacional amplia y técnicamente coherente con las necesidades de una planta destinada a producir biopelículas a partir de mucílago de café.

Tabla 5.

Personal requerido para el escalamiento industrial

Nómina						
Cargo	Perfil	Responsabilidades	Número	Salario Nominal	Factor Prestacional	Total
Gerente de planta	MBA, 15 años de experiencia.	Dirección general de la planta y supervisión en cumplimiento de metas de producción	1	\$ 18.000.000	1,6	\$ 345.600.000
Contador	Contador público con experiencia en manufactura	Control presupuestal y reportes tributarios	1	\$ 5.500.000	1,6	\$ 105.600.000
Ingeniero químico/alimentos	Ingeniero químico o de alimentos con experiencia en control de calidad y seguridad de procesos	Coordinador técnica del proceso productivo (calidad)	1	\$ 5.500.000	1,6	\$ 105.600.000
Ingeniero de procesos	Ingeniero de procesos con experiencia en optimización, análisis de procesos, diseño y modelamiento	Optimización del proceso y estandarización de parámetros	1	\$ 6.000.000	1,6	\$ 115.200.000
Laboratorista	Tecnólogo en química con buenas prácticas de laboratorio y manejo de instrumentos analíticos	Ejecución de ensayos de caracterización del mucilago y biopelículas (control de calidad rutinario)	3	\$ 2.800.000	1,6	\$ 161.280.000
Ingeniero de mantenimiento	Experiencia mínima de 3 a 5 años en mantenimiento preventivo y correctivo de maquinaria de proceso (reactores, sistemas de secado, bombas, motores, sistemas térmicos e instrumentación).	Diagnóstico y reparación de fallas críticas	1	\$ 7.000.000	1,6	\$ 134.400.000
Técnico de mantenimiento	Técnicos en electricidad, mecánica básica y operación de equipos	Soporte técnico a los equipos del proceso	2	\$ 6.000.000	1,6	\$ 230.400.000
Operador de recepción y pretratamiento de mucilago	Técnico o bachiller con experiencia mínima de 1 año en manejo de materias primas, control de inventarios o procesos de filtración y tamizado en plantas de alimentos o bioprocesos.	Recepción de la materia prima, verificación visual de calidad, registro de cantidades recibidas,	2	\$ 2.000.000	1,8	\$ 86.400.000
Operador de secado de materia prima	Técnico en procesos industriales, alimentos o química con experiencia mínima de 1-2 años en operación de secadores industriales,	Carga del material en bandejas, control de temperatura y tiempo de secado, monitoreo de la humedad final del producto	3	\$ 2.000.000	1,8	\$ 129.600.000
Operador de área de mezcla y formulación	Técnico en procesos industriales, alimentos o química con experiencia mínima de 1-2 años en operación de secadores industriales,	Preparación de las fases del proceso, control de temperatura durante la disolución de gelatina, incorporación de mucilago y almidones	4	\$ 2.000.000	1,8	\$ 172.800.000
Operador de formación y secado del film	Técnico en procesos industriales o alimentos con experiencia en manejo de túneles de secado, control de parámetros de secado	Monitorean la formación de la biopelícula y aseguran que el secado sea uniforme sin defectos estructurales.	3	\$ 2.000.000	1,8	\$ 129.600.000
Operador de área de corte y acondicionamiento del producto final	Bachiller o técnico con experiencia mínima de 1 año en operación de maquinaria de corte industrial, control dimensional del producto y manejo de empaques o acondicionamiento final.	Monitorean la formación de la biopelícula y aseguran que el secado sea uniforme sin defectos estructurales.	2	\$ 2.000.000	1,8	\$ 86.400.000
Servicios generales	Bachiller	Aseo y limpieza industrial	2	\$ 1.500.000	1,8	\$ 64.800.000
Total						\$ 1.867.680.000

Nota: Los valores presentados corresponden a una estimación de los costos asociados al personal requerido para la operación del proyecto, considerando salarios nominales y factores prestacionales vigentes para el sector industrial en Colombia en 2025. Fuente de elaboración propia (2025)

Desde el punto de vista económico, los salarios representan uno de los componentes más significativos del OPEX anual del proyecto, alcanzando un total estimado de \$1.868 millones

COP por año, cifra que refleja tanto la cantidad de trabajadores necesarios como la especialización técnica del proceso. La mayor proporción del gasto se concentra en los 14 operarios de producción, quienes, dada la naturaleza semi-industrial y el flujo de operación por lotes, realizan operaciones manuales y supervisión directa de equipos como reactores, mezcladores y túneles de secado. Su costo total anual asciende a más de \$604 millones COP, equivalente a cerca del 40% del presupuesto total de nómina, lo cual es típico en industrias donde la manipulación de materiales y el control visual de calidad aún no están automatizados.

Técnicos

Los equipos seleccionados para la línea de producción de biopelículas a partir de mucílago de café deben cumplir especificaciones técnicas que garanticen eficiencia operativa, estabilidad del proceso y calidad del producto final. La naturaleza del mucílago, su sensibilidad térmica y la necesidad de obtener un film homogéneo exigen condiciones de operación controladas, materiales adecuados y sistemas de automatización confiables (Food Processing Technology, 2022).

En primera instancia, los tanques de recepción en acero inoxidable deben poseer superficies sanitarias grado 304 o 316, soldaduras higiénicas y válvulas de drenaje rápido, permitiendo la manipulación de materia prima fresca sin riesgo de contaminación microbiológica (Rossi et al., 2024). Estos materiales son ampliamente utilizados en la industria alimentaria y biotecnológica debido a su resistencia a la corrosión y facilidad de limpieza bajo estándares sanitarios industriales (Santamaria et al., 2020).

Estos tanques deben incorporar sistemas de filtrado primario o mallas internas intercambiables para retener los sólidos y garantizar un flujo limpio hacia las siguientes etapas. La filtración inicial es la operación clave para remover impurezas y evitar que partículas no

deseadas afecten procesos posteriores como la mezcla o la formación de la película biopolimérica (Awad et al., 2018).

El sistema de filtración y tamizado requiere de mallas entre 80 y 120 micras, estructura de acero inoxidable y capacidad para operar en flujo continuo. Su función es asegurar la eliminación de impurezas que pueden afectar la textura del film o inferir en la mezcla en el reactor (Rhim et al., 2013).

El secador de bandejas o de aire caliente debe permitir un rango de operación entre 40 °C y 70 °C, control digital de temperatura y ventilación uniforme. Esto es indispensable para reducir la humedad del mucílago sin degradar compuestos funcionales ni alterar su capacidad gelificante.

Los reactores de proceso, tanto el de fase caliente como el reactor principal, requieren construcción en acero inoxidable con camisa térmica, sensores de temperatura, sistema de agitación regulable rpm y aislamiento térmico para favorecer un calentamiento uniforme (Tharanathan, 2003). El reactor caliente debe asegurar el mantenimiento estable de 60–65 °C, temperatura crítica para la gelatinización controlada de los polímeros naturales presentes. El tanque de mezcla fría debe operar entre 20 y 30 °C y contar con agitación suave para evitar la prematura formación de geles. Su precisión térmica es crucial para asegurar que la suspensión de almidón y mucílago se mantenga estable antes de integrarse al reactor principal (Mathew et al., 2009).

El homogeneizador de alta velocidad debe operar en el rango de 3.000–12.000 rpm, asegurando una dispersión fina de los componentes y evitando la formación de grumos o agregados que afecten la transparencia del film. Los procesos de homogeneización permiten

reducir el tamaño de partículas y mejorar la estabilidad de las dispersiones poliméricas utilizadas en biopelículas (McClements, 2015).

El túnel de secado industrial debe mantener temperaturas entre 25 y 35 °C, con control de humedad relativa entre 40 % y 60 %, circulación suave de aire y bandejas antiadherentes. Esto permite un secado lento y uniforme sin deformaciones ni craquelado del material (Szawara-Nowak et al., 2013). Estas condiciones favorecen un secado uniforme y previenen defectos estructurales en las películas comestibles.

Finalmente, la cortadora de láminas debe ofrecer control de ancho, longitud y espesor, permitiendo la estandarización del producto final para facilitar su empaque y posterior comercialización. La estandarización dimensional es un requisito importante para la reproducibilidad industrial y la calidad del producto final en materiales poliméricos de origen biológico (Rhim et al., 2013).

La tabla 6 presenta los costos de los equipos requeridos para el escalamiento industrial

Tabla 6.

Equipos requeridos para el escalamiento industrial

Equipo	Función	Precio	Link de consulta
Tanques de recepción de acero inoxidable	Almacenar el mucílago fresco, permitir filtrado primario y evitar contaminación	\$ 12.000.000,00	https://oakstills.com/es/products/stainless-steel-non-jacket-alcohol-storage-tank?variant=50785166131493&country=AR&currency=USD&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&srsltid=AfmBOoppQxBcbWnvDX3rf17nqMBLH-dRUq1qWjFp9rePXp2HM8s80t55cs0
Secador de bandejas o por aire caliente (capacidad 20-50 kg/batch)	Reducir la humedad del mucílago para permitir su estabilidad y posterior molienda	\$ 6.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Hot-Air-Food-Dehydrator-100KG_1600942218045.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.206d67afY0dhwC&priceId=50f4f01d7c6542b9ff040abed53be1c
Reactor de acero inoxidable de 500-1000 L con camisa de calentamiento	Disolver la gelatina a 60-65°C y generar la fase gelificante	\$ 35.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/1000L-1500L-Stainless-Steel-Polyester-Resin_1601214702822.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.10c467afa0yXML&priceId=df64156841e4f768aa4f7a377e740e5
Tanque de mezcla frío (300-500 L)	Permitir la suspensión de almidones y mucílago sin iniciar gelatinización	\$ 17.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/1000L-500L-300L-High-quality-Stainless_1601559021130.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.3e8767afYUpqPr&priceId=81a4476f02be48949af93690c2ee09f3
Reactor principal de mezcla (1000L) con camisa térmica	Integrar fase caliente y fase fría con control gradual de temperatura	\$ 50.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/100L-200L-300L-500L-1000L-Stainless_1601244390584.html?spm=a2700.details.you_may_like.2.2387524cnGD9eM
Sistema de dosificación gravimétrica	Asegurar la adición precisa de glicerol, propilenglicol, ácidos, etc	\$ 10.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/Weighing-Masterbatch-Colorant-Feeder-Gravimetric-Dosing_10000010908472.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.2d7167afqWELdG&priceId=55055a0e255c417f8f1d8441f4e71618
Homogenizador de alta velocidad	Optimizar distribución de partículas y uniformidad	\$ 6.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/DZJX100L-200L-500L-1000L-2000L-Industrial_1601124664638.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.557967afn9uX2A&priceId=049116fc34f24b3e839f6f028ac0ebf4
Túnel de secado industrial (25-35°C)	Secado controlado del film sin corrientes de aire bruscas	\$ 85.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/Tunnel-Type-Multi-function-Industrial-Microwave_1601014200048.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.18ed67af0Hx3yq&priceId=4fac00b6e619412b95b48506dd172929
Cortadora de láminas	Austar dimensiones finales del producto	\$ 8.600.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/Siu-Mai-Skin-Maker-Dough-Sheet_1600805600702.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.f37967afhpwzie&priceId=8aa0d289d4af46e9b14319994064a869
Total		\$ 249.600.000,00	

Nota: Los valores presentados corresponden a una estimación de los costos asociados a la maquinaria requerida para la operación del proyecto. Fuente de elaboración propia (2025).

La tabla 6 presenta un desglose de una inversión fija de \$250.000.000 aproximadamente, que está enfocada en establecer una línea de procesamiento industrial especializada en el manejo de mucílago y gelatina, sugiriendo la producción de biopolímeros o *films* con alto valor agregado.

En este sentido, se evidencia que los mayores costos se concentran en el reactor principal con camisa térmica y en el túnel de secado industrial, lo cual resulta coherente considerando que son las etapas donde realmente se define la formación, la estructura y la estabilidad del material. Desde esta perspectiva, el control de la temperatura durante la mezcla, junto con un secado progresivo y sin alteraciones externas, resulta clave para evitar defectos en el *film*, por lo que la alta inversión en estos equipos se entiende como una decisión necesaria dentro del CAPEX.

Por otro lado, los equipos de costo intermedio y bajo también reflejan una asignación estratégica del presupuesto, aunque con un enfoque más orientado al control del proceso que a transformación directa del producto. En este caso, unidades como el tanque de mezcla en frío de 500L, con un valor de 17 millones, y el reactor secundario, con un valor de 35 millones, representan una inversión importante porque permiten separar etapas y manejar condiciones específicas sin afectar la estabilidad del sistema, lo que ayuda a reducir riesgos operativos y posibles pérdidas económicas por reprocesos.

En cuanto a equipos como el homogeneizador, el secador de bandejas y los tanques de recepción, su menor participación en el CAPEX muestra que son tecnologías más estandarizadas, pero aun así necesarias para garantizar continuidad en el proceso y condiciones adecuadas desde las etapas iniciales. Finalmente, la cortadora de láminas, aunque representa un costo relativamente bajo, está asociada al acabado del producto, lo que indica que la inversión en esta etapa es más limitada porque no influye directamente en la estructura del material, sino en su presentación final.

Conclusiones

Los resultados demuestran que el mucílago de café es un insumo viable para la obtención de biopelículas. No obstante, se identifica la necesidad de optimizar la formulación particularmente la relación de plastificantes y espesantes para mejorar la resistencia mecánica.

Los resultados obtenidos muestran que, aunque la película elaborada presenta un espesor mayor al ideal, mantiene su integridad tras 24 horas en agua, soporta una carga de 28 g antes de romperse y exhibe cierta capacidad de flexión, lo que permite concluir que el mucílago de café puede formar una matriz funcional, pero aún requiere optimización para acercarse a las características mecánicas y físicas de una biopelícula estándar.

La propuesta representa una alternativa novedosa para la valorización de residuos del beneficio del café, al transformar un subproducto de bajo valor en un material con potencial de aplicación, lo que impulsa la economía circular, fomenta el uso eficiente de los recursos y contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles e innovadoras dentro del sector agroindustrial.

El análisis de comportamiento durante la formulación confirmó que el mucílago cumple con funciones similares a las de un biopolímero, actuando como agente espesante, aglutinante y filmógeno natural, con ayuda de los demás aditivos, que refuerza su potencial como material base para empaques biodegradables.

Referencias Bibliográficas

- Ali, M., Ali, A., Ali, S., Chen, H., Wu, W., Liu, R., Chen, H., Ahmed, Z. F. R., & Gao, H. (2025). Global insights and advances in edible coatings or films toward quality maintenance and reduced postharvest losses of fruit and vegetables: An updated review. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 24(1).
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.70103>
- Awad, T. S., Asker, D., & Hatton, B. D. (2018). Food-Safe modification of stainless steel Food-Processing surfaces to reduce bacterial biofilms. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(27), 22902–22912. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b03788>
- Biratu, G., Woldemariam, H. W., & Gonfa, G. (2024). Development of active edible films from coffee pulp pectin, propolis, and honey with improved mechanical, functional, antioxidant, and antimicrobial properties. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8(100557), 100557.
<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100557>
- Bondam, A. F., Da Silveira, D. D., Santos, J. P. D., & Hoffmann, J. (2022). *Phenolic compounds from coffee by-products: Extraction and application in the food and pharmaceutical industries*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Phenolic-compounds-from-coffee-by-products%3A-and-in-Bondam-Silveira/723820d6a515f8364ec634cabe8cca15f0766d2f>
- Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2012). Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles. *International Journal Of Molecular Sciences*, 13(7), 8615-8627. <https://doi.org/10.3390/ijms13078615>
- Colombia sigue aumentando su producción cafetera, con una cifra que se aproxima a los 14 millones de sacos al cierre del 2024 - Federación Nacional de Cafeteros.* (2025,

January 9). Federación Nacional De Cafeteros.

<https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/colombia-sigue-aumentando-su-produccion-cafetera-con-una-cifra-que-se-aproxima-a-los-14-millones-de-sacos-al-cierre-del-2024/>

Coffee Annual. (s/f). *Report Number: CO2025-0014*. Usda.gov. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee+Annual_Bogota_Colombia_CO2025-0014.pdf

Del Medio Ambiente, D. (2023, 16 octubre). El aprovechamiento de residuos de café como solución sostenible. Derecho del Medio Ambiente.

<https://medioambiente.uexnado.edu.co/el-aprovechamiento-de-residuos-de-cafe-como-solucion-sostenible>.

Dokl, M., Copot, A., Krajnc, D., Fan, Y. Van, Vujanović, A., Aviso, K. B., Tan, R. R., Kravanja, Z., & Čuček, L. (2024). Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 498–518. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.025>

Genanaw, W., Kanno, G. G., Derese, D., & Aregu, M. B. (2021). Effect of Wastewater Discharge From Coffee Processing Plant on River Water Quality, Sidama Region, South Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 15. <https://doi.org/10.1177/11786302211061047>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

- Gil-Gómez, J. A., Florez-Pardo, L. M., & Leguizamón-Vargas, Y. C. (2024). Valorization of coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. In *Discover Applied Sciences* (Vol. 6, Issue 9). Springer Nature.
<https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9>
- Havare, D., Bilge, D., Diraz-Yildirim, E., & Özçelik, S. (2019). Coffee starter microbiome and in-silico approach to mucilage degradation. *Food Research International*, 123, 248–257. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.072>
- Huang, J.-Y., Liao, J.-S., Qi, J.-R., Jiang, W.-X., & Yang, X.-Q. (2021). Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel. *Food Hydrocolloids*, 110(106140), 106140.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106140>
- Jaynes, C. H. (2025, April 14). Global plastic recycling Rate ‘Stagnant’ at 9%: study. *EcoWatch*. <https://www.ecowatch.com/global-plastic-recycling-rate.html>
- Li, X., et al. (2025). Reduction of carbon and water footprints in wet coffee processing through membrane-bioreactor reuse. *Cleaner Environmental Systems*, 15, 100562.
<https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100562>
- Machado, D. B., & de Oliveira, R. A. (2023). Functional and technological properties of coffee mucilage (coffea arabica) and its application in edible films. *Quimica Nova*, 46(8), 778–784. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230052>
- Mathew, M. E., Mohan, J. C., Manzoor, K., Nair, S., Tamura, H., & Jayakumar, R. (2009). Folate conjugated carboxymethyl chitosan–manganese doped zinc sulphide nanoparticles for targeted drug delivery and imaging of cancer cells. *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.047>
- McClements, D. J. (2015). Food emulsions. <https://doi.org/10.1201/b18868>

- Mohan, G., et al. (2025). Advanced oxidation processes for coffee processing wastewater: Characteristics and treatment prospects. *Journal of Water Process Engineering*, 73, 104045. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.104045>
- Montes, C. A., Ortiz, N. V., Arias, C. A., & Chaparro, T. R. (2023). Vertical flow wetlands as the core for the sustainable treatment of coffee wastewater in small communities in Colombia: preliminary results of the treatment of coffee wastewater in rural areas by vertical flow wetlands. *Water Science and Technology*, 88(8), 1974–1981. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.328>
- Noori, M. T., Park, M., & Min, B. (2025). Accelerating CO₂ conversion to volatile fatty acids using metal-organic framework–biocathode interfaces in microbial electrosynthesis. *Bioresource Technology Reports*, 32(102341), 102341. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102341>
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/support-materials/2022/02/global-plastics-outlook_a653d1c9/Global%20Plastics%20Outlook%20I.pdf
- (S/f). Oecd.org. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de https://www.oecd.org/en/publications/2022/02/global-plastics-outlook_a653d1c9.html
- (S/f-b). Oecd.org. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de https://www.oecd.org/en/publications/policy-scenarios-for-eliminating-plastic-pollution-by-2040_76400890-en.html

- (S/f). Mdpi.com. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de <https://www.mdpi.com/2311-5637/8/10/519>
- (S/f-b). Mdpi.com. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de <https://www.mdpi.com/2078-1547/7/2/19>
- (S/f-c). Mdpi.com. Recuperado el 6 de noviembre de 2025, de <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/18/2362>
- (S/f). Mdpi.com. Recuperado el 7 de noviembre de 2025, de <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/2042>
- (S/f). Rsc.org. Recuperado el 6 de noviembre de 2025, de <https://books.rsc.org/books/monograph/1994/chapter/4570132/Introduction-to-Green-Chemistry>
- (S/f-b). Recuperado el 6 de noviembre de 2025, de <http://file:///C:/Users/SY019405/Downloads/Dialnet-ObtencionDePectinaEmpleandoTecnologiasEmergentesDe-10303136.pdf>
- Rattan, S., Parande, A. K., Nagaraju, V. D., & Ghiwari, G. K. (2015). A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science And Pollution Research*, 22(9), 6461-6472. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>
- Reichembach, L. H., et al. (2020). Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties. *Carbohydrate Polymers*, 248, 116768.
- Rhim, J., Park, H., & Ha, C. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>

- Rodríguez V., N.; Quintero y., L. V. (2015). Índice de manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café. *Disciplina Gestión de Recursos Naturales y Conservación*. 2015.
- Rossi, S., Leso, S. M., & Calovi, M. (2024). Study of the corrosion behavior of stainless steel in food industry. *Materials*, 17(7), 1617. <https://doi.org/10.3390/ma17071617>
- Said, N. S., & Lee, W. Y. (2025). Pectin-based active and smart film packaging: A comprehensive review. *Molecules*, 30(5), 1144. <https://doi.org/10.3390/molecules30051144>
- Santamaria, M., Tranchida, G., & Di Franco, F. (2020). Corrosion resistance of passive films on different stainless steel grades in food and beverage industry. *Corrosion Science*, 173, 108778. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108778>
- Shen, X., et al. (2024). Microbial characteristics and functions in coffee processing. *Fermentation*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010005>
- Syarifuddin, A., Muflih, M. H., Izzah, N., Fadillah, U., Ainani, A. F., & Dirpan, A. (2025). Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy- A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 9(100680), 100680. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100680>
- Szawara-Nowak, D., Koutsidis, G., Wiczowski, W., & Zieliński, H. (2013). Evaluation of the in vitro inhibitory effects of buckwheat enhanced wheat bread extracts on the formation of advanced glycation end-products (AGEs). *LWT*, 58(2), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.03.005>

Tharanathan, R. (2003). Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71–78.

[https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(02\)00280-7](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(02)00280-7)

UNEP – United Nations Environment Programme. (2023). Turning off the tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. Nairobi: UNEP.

Vallejos-Jiménez, A., Cadena-Chamorro, E. M., Santa, J. F., Buitrago-Sierra, R.,

Dugmore, T. I. J., Bose, S., & Matharu, A. S. (2025). Development of Novel

Pectin-Based Films from Coffee Waste: Mucilage and Pulp. *Waste And Biomass*

Valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-02926-9>