

**PRODUCCIÓN DE UNA BIOPELÍCULA A PARTIR DE LAS PECTINAS
EXTRAÍDAS DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ**

**MYRIAM CRISTINA GUERRA GONZALEZ
DIANA CAROLINA RUEDA SILVA**

**Proyecto Integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Orientador

**Iván Andrés González Vargas
MSc Ciencias Biología**

Codirección

**Adriana Inés Páez Morales
Microbióloga Industrial**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C Julio de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Dedico mi proyecto de grado principalmente a mis padres, quienes me apoyaron desde un inicio en todo lo que me propuse a través de mi carrera, quienes con sus consejos y enseñanzas hacen que cada día sea una mejor persona.

A mi hermano, quien me acompañó con sus conocimientos en la culminación de mis estudios profesionales y siempre me da ánimo para seguir adelante.

Myriam Cristina Guerra González

Dedico mi proyecto de grado inicialmente a Dios, por ser mi inspirador y darme fuerza para dar cada paso a lo largo de mi carrera, a mis padres, quienes han sido mi motor de vida, por su amor, trabajo, apoyo y sacrificio, por darme un futuro y convertirme en quien soy hoy en día.

A mis hermanos, quienes me han apoyado y me han brindado sus experiencias y conocimientos para salir adelante y ser una excelente profesional y quienes han estado conmigo en cada momento.

A mi tía, quien siempre ha creído en mí y me ha apoyado en cada sueño por cumplir, quien me ha brindado su amor y su sabiduría. A toda mi familia por sus consejos, palabras de aliento y su enseñanza en cada etapa de mi vida. A mi novio, quien me ha apoyado a lo largo de mi carrera, quien me ha brindado sus conocimientos, su amor y quien siempre está presente en cada paso.

Diana Carolina Rueda Silva

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por darnos la sabiduría y fortaleza para terminar este proyecto de grado y nuestra carrera profesional.

A nuestros padres, y hermanos quienes nos brindaron amor y cariño, ánimo y fortaleza en nuestros momentos de ansiedad y tensión.

A la Fundación Universidad de América y profesores, por brindarnos una formación ética y académica como Ingenieras Químicas.

A la Universidad Santiago de Cali, por permitirnos entrar a sus instalaciones y alcanzar de esta manera los resultados en el laboratorio.

Al director Iván González, por guiarnos y aconsejarnos en todo momento, logrando así la finalización del proyecto.

A Ricardo Navia, quien nos suministró la materia prima necesaria para el proyecto de su finca la Argelia y quien con sus conocimientos acerca de la cosecha y proceso del café nos orientó para obtener los objetivos del proyecto.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	14
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1. Proceso de beneficiado de café	15
1.2. Remoción de mucílago	16
1.2.1. <i>Fermentación</i>	17
1.2.2. <i>Desmucilaginado mecánico</i>	18
1.3. Generalidades de las pectinas	18
1.3.1. <i>Métodos de extracción de pectinas</i>	20
1.3.2. <i>Caracterización de las pectinas</i>	22
1.4. Generalidades de biopelícula	23
1.4.1. <i>Propiedad mecánica - Fuerza a la tensión</i>	23
1.4.2. <i>Propiedades físicas</i>	24
1.4.3. <i>Disposiciones legales</i>	24
1.5. Estimación de costos	24
2. METODOLOGÍA	26
2.1. Selección del método de extracción de pectina	26
2.1.1. <i>Criterios de selección</i>	26
2.1.2. <i>Obtención de materia prima</i>	28
2.1.3. <i>Extracción de pectina de mucílago</i>	30
2.1.4. <i>Caracterización de pectina extraída</i>	32
2.2. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la biopelícula obtenida a diferentes concentraciones de pectina de mucílago de café.	33
2.2.1. <i>Caracterización de películas de pectina</i>	35
2.3. Descripción de las especificaciones técnicas y condiciones del proceso a nivel planta piloto.	36

2.4. Estimación de los costos generados en la extracción de pectinas de mucílago de café y la elaboración de biopelículas.	37
3. ANALÍISIS DE RESULTADOS	38
3.1. Selección de método de extracción	38
3.1.1. <i>Análisis de criterios de selección</i>	38
3.1.2. <i>Caracterización del mucílago de café</i>	50
3.1.3. <i>Extracción de pectina por método seleccionado</i>	52
3.1.4. <i>Caracterización de pectina</i>	53
3.2. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de películas de la biopelícula obtenida a diferentes concentraciones de pectina de mucílago de café.	57
3.2.1. <i>Caracterización de películas de pectina</i>	64
3.3. Descripción de especificaciones técnicas y condiciones de proceso a nivel planta piloto	66
3.3.1. <i>Balance de masa</i>	68
3.4. Estimación de los costos generados en la extracción de pectinas de mucílago de café y la elaboración de biopelículas.	77
4. CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de beneficiado de café.	16
Figura 2. Composición interna del fruto de café.	17
Figura 3. Estructura química de la pectina.	19
Figura 4. Localización de la finca La Argelia.	28
Figura 5. Proceso de beneficiado de café en la Finca La Argelia.	29
Figura 6. Desmucilagador mecánico utilizado en la Finca La Argelia.	29
Figura 7. Resultados de pruebas microbiológicas de la materia prima.	51
Figura 8. Etapas de extracción de pectina por hidrólisis ácida.	52
Figura 9. Prueba de solubilidad.	54
Figura 10. Titulación para la determinación de peso equivalente y acidez libre.	54
Figura 11. Prueba de porcentaje de metoxilo.	56
Figura 12. Elaboración de películas a partir de pectina cítrica al 2% p/v.	60
Figura 13. Elaboración de películas a partir de pectina cítrica al 4% p/v.	60
Figura 14. Elaboración de películas de pectina cítrica al 2% sin Aceite mineral y Tween 80.	61
Figura 15. Elaboración de películas de pectina cítrica al 4% sin Aceite mineral y Tween 80.	62
Figura 16. Películas obtenidas de pectina de mucílago de café.	63
Figura 17. Películas obtenidas de la combinación de pectina cítrica y de mucílago de café.	64
Figura 18. Gráficas Wt-W0 vs tiempo.	65
Figura 19. Balance de masa para el proceso de acondicionamiento.	69
Figura 20. Balance de masa para el proceso de hidrólisis ácida.	70
Figura 21. Balance de masa para el proceso de filtración.	71
Figura 22. Balance de masa para el proceso de precipitación.	72
Figura 23. Balance de masa para el proceso de secado.	72
Figura 24. Balance de masa para el proceso de precipitación.	73
Figura 25. Balance de masa para el proceso de precipitación.	74
Figura 26. Depreciación de los equipos industriales requeridos.	77
Figura 27. Flujo de caja del proyecto.	80
Figura 28. Diagrama general del proceso de obtención de pectina.	95
Figura 29. Diagrama general del proceso de elaboración de solución formadora de película	96
Figura 30. Equipos y pruebas de laboratorio empleadas para caracterizar el mucílago	97
Figura 31. Diagrama PFD del proceso escalado de nivel laboratorio a nivel planta piloto.	102
Figura 32. Diagrama PFD del proceso optimizado a nivel planta piloto.	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ponderación de criterios de selección de método de extracción.	27
Tabla 2. Diseño de experimentos planteado.	34
Tabla 3. Descripción del equipo empleado según método extracción.	38
Tabla 4. Revisión bibliográfica compilada sobre métodos de extracción.	40
Tabla 5. Costos de implementación de los métodos de extracción.	45
Tabla 6. Calificación del método de extracción según revisión bibliográfica.	47
Tabla 7. Calificación del método de extracción de acuerdo al consumo de energía.	47
Tabla 8. Consolidación de la calificación final para cada uno de los métodos.	48
Tabla 9. Datos obtenidos en la preparación de la materia prima.	50
Tabla 10. Proceso realizado para la extracción de pectina y elaboración de biopelícula a escala industrial.	67
Tabla 11. Especificaciones técnicas y condiciones de operación de los equipos utilizados.	75
Tabla 12. Precios de equipos requeridos.	77
Tabla 13. Precio y cantidad anual requerida para cada uno de los insumos del proceso.	78
Tabla 14. Precio de venta de la biopelícula.	78

RESUMEN

El mucílago de café es un residuo agroindustrial que genera un gran impacto ambiental, por lo tanto, el uso de este en la producción de biopelículas, representa una alternativa para mitigar el efecto causado por estos desechos, al igual que contribuir a la reducción de plásticos convencionales. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una propuesta para la producción de biopelículas, a partir de una concentración 4% p/v de pectina y glicerol a 1%p/v con un diseño experimental de un factor donde se evalúan películas elaboradas a base de pectina cítrica, pectina compuesta y pectina de mucílago la cual fue extraída por el método seleccionado (hidrólisis ácida), evaluando sus propiedades físicas y mecánicas. Por último, según el proceso realizado en el laboratorio, se lleva el cabo el balance de masa tomando como base de cálculo 7425 Kg de mucílago/día, con el fin de describir las especificaciones técnicas y condiciones de los equipos de proceso, para estimar así los costos generados tanto en la extracción de pectina como en la elaboración de biopelículas.

PALABRAS CLAVE: Beneficiado de café, residuo agroindustrial, método de extracción, recubrimiento.

INTRODUCCIÓN

El café es un producto agrícola de gran importancia para Colombia, su producción representa el 18% de la actividad económica del sector agrícola y genera aproximadamente 730 mil empleos directos en las zonas cafeteras del país.[1] Para su proceso de transformación de fruto de café maduro a café seco de carácter comercial se realizan las etapas de recolección del fruto, clasificación del fruto, despulpado, remoción del mucílago del café, lavado del café fermentado, y, secamiento del café lavado.[2] Esta industria cafetera se considera una actividad de gran peso para Colombia, no obstante, en la canasta familiar se suele consumir el producto de mayor valor agregado el cual es el grano de café, así, de acuerdo con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, menos del 5% de la biomasa generada en el proceso de café se aprovecha en la elaboración de la bebida;[3] por lo tanto, el porcentaje restante son residuos que pueden llegar a contaminar los efluentes de agua. Con el fin de seguir contribuyendo con el progreso económico de algunas poblaciones rurales, actualmente estos desechos obtenidos pueden ser utilizados como materia orgánica, biocombustibles o como combustible directo para el proceso; sin embargo, el mucílago, residuo obtenido del desmucilaginado, no tiene una reutilización adecuada en las fincas cafeteras pues no en todas se realiza el tratamiento que mitigue la afectación de los cuerpos de agua, por lo que es visto aún como un residuo especial con pocas investigaciones para incursionar en nuevas aplicaciones. Conforme con una investigación de Cenicafé, el mucílago representa alrededor de 14,85% del peso del fruto fresco y por cada millón de sacos de 60 Kg de café, se generan cerca de 55.000 toneladas de mucílago. Por consiguiente, si el mucílago no se utiliza adecuadamente causaría una contaminación equivalente a la generada en un año por una población de 310.000 habitantes.[3]

Esta materia prima contiene compuestos como proteínas, lípidos, carbohidratos y polisacáridos para dar un producto con mayor valor agregado, entre estos se encuentran los compuestos pécticos que conforman entre el 5,39% a 17,45% del peso del mucílago en base seca[4] además de tener aplicación en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. Las pectinas son polisacáridos utilizados comúnmente como agente gelificante en productos como mermeladas y jaleas, adicional, estas funcionan como

agentes encapsulantes de enzimas y recubrimientos de fármacos en la industria farmacéutica y biotecnológica.[5]

Una opción resulta en el aprovechamiento de la pectina para la formación de biopelículas como recubrimiento de alimentos, esto debido a que existe una necesidad de reemplazar los plásticos utilizados generalmente en las envolturas como el tereftalato de polietileno (PET), policloruro de polivinilo(PVC), polietileno(PE), polipropileno(PP), poliestireno y poliamida, los cuales en Colombia son los que contribuyen en un 12% a los residuos producidos, de los cuales, tan solo el 8,6 por ciento es reciclado.[6]

Finalmente, este trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta para la producción de biopelículas a partir de la pectina extraída de mucílago de café, con el fin de emplear este subproducto del proceso de beneficiado de café y así contribuir con la reducción del impacto ambiental que este ocasiona.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la producción de una biopelícula a partir de la extracción de pectinas de mucílago de café.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar un método de extracción de pectinas de mucílago de café.
2. Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la biopelícula obtenida a diferentes concentraciones de pectina de mucílago de café.
3. Describir las especificaciones técnicas y condiciones del proceso a nivel planta piloto.
4. Estimar los costos generados en la extracción de pectinas de mucílago de café y la elaboración de biopelículas.

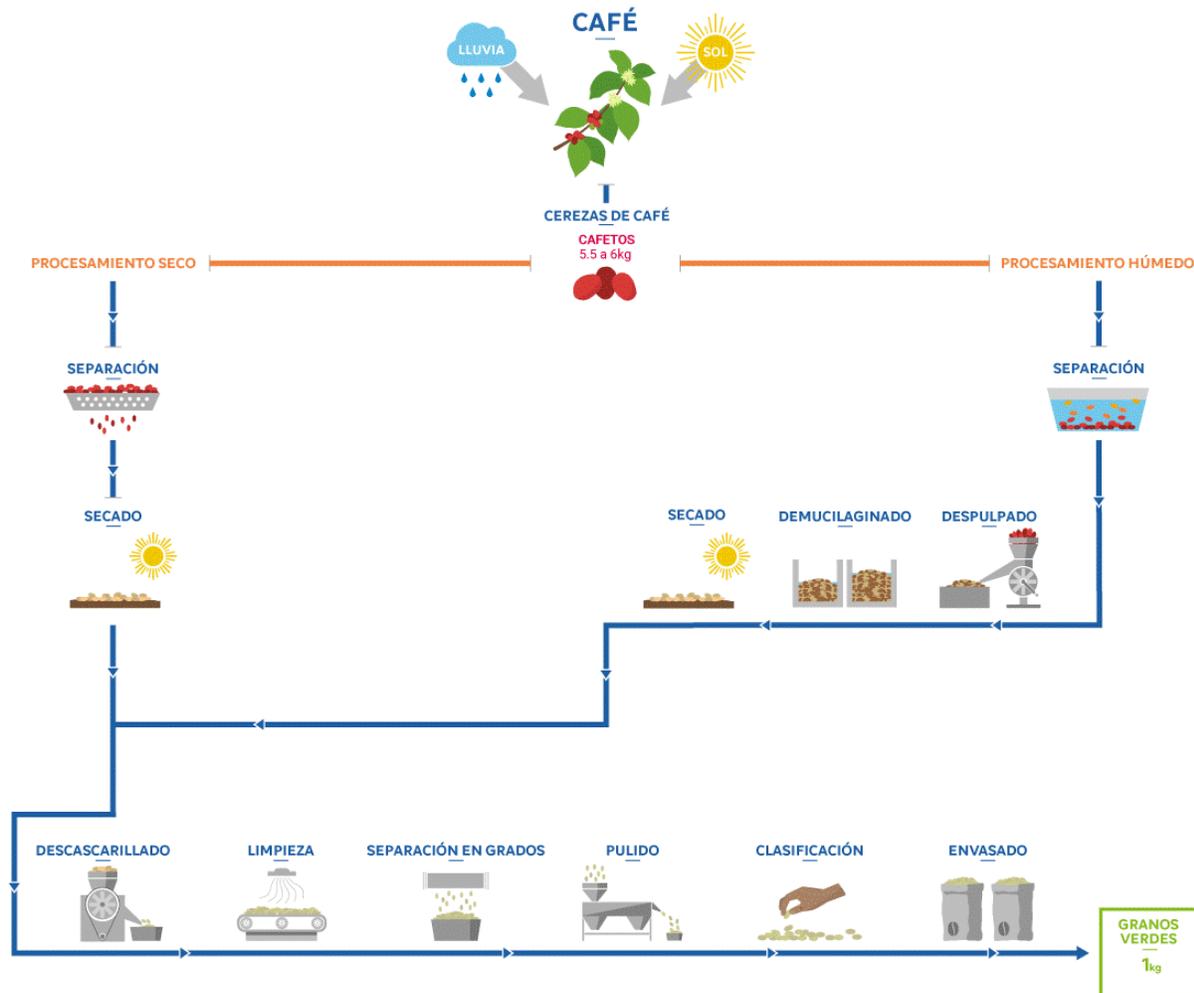
1. MARCO TEÓRICO

1.1. Proceso de beneficiado de café

Es el proceso mediante el cual se prepara el café, comprendiendo varias etapas para la estabilización de las cualidades del fruto manteniendo la buena calidad del café, pues es el factor determinante de un buen beneficiado[7]. Este proceso inicia por medio del procesamiento de las cerezas de café mediante dos métodos, vía húmeda, en donde se producen los cafés comúnmente llamados “suaves” o “lavados” que se distinguen por su alta calidad en taza; mientras que en la vía seca se producen los cafés naturales, que tienen menor calidad y requieren de mayor energía para secar la fruta [7]. En esta vía seca se realiza solamente una cosecha total y posteriormente se pasa al secado para terminar en la fase seca, mientras que en la vía húmeda se requiere un tratamiento más largo compuesto por una cosecha selectiva, un despulpado, posteriormente un desmucilaginado, lavado y clasificado para consecutivamente pasar al secado y luego a la fase seca, que es en donde se prepara el café pergamino seco a oro. En esta última vía, se evidencia la mayor cantidad de residuos por el proceso realizado, siendo uno de estos el mucílago de café, materia prima de interés para la investigación.

Figura 1.

Proceso de beneficiado de café.



Nota. La figura muestra las alternativas seca y húmeda para realizar el proceso de beneficiado de café. Tomado de: S&D SUCDEN (s.f.). “DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO”. [En línea]. <https://www.sucden.com/es/products-and-services/coffee/process-flowchart/> [Acceso: febrero 10, 2021].

1.2. Remoción de mucílago

El mucílago hace parte del mesocarpio del fruto y en su mayoría está constituido por azúcares y sustancias pécticas las cuales le dan la propiedad de formación de un hidrogel que resulta negativa pues dificulta el lavado del grano. Este componente representa el 14,85% de peso fresco del fruto según la precipitación pluvial presente previa a la recolección, además es el responsable del 25% de la capacidad contaminante de la cereza; es por esto que su remoción está ligada al favorecimiento del secado del grano

sin deteriorar su calidad por los efectos de “fermentos”[8]. Para este fin, cada productor debe tener en cuenta y elegir la mejor opción de remoción de éste en base a criterios como no afectar la calidad natural o propia del café, que sea de fácil manejo, que su grado de afectación al medio ambiente sea mínimo y que cuente con los recursos económicos. Sin embargo, en la presente investigación, se busca obtener en el mejor estado la remoción de este componente, debido a que son estos elementos de azúcares y sustancias pécticas quienes serán claves para el desarrollo. Esta separación de mucílago se puede realizar de tres formas, la primera es mediante la fermentación natural o enzimática, la segunda es la fermentación química y, finalmente el desmucilaginado mecánico. En la figura 2, se observa el fruto de café con su composición interna.

Figura 2.

Composición interna del fruto de café.



Nota. La figura muestra el fruto y sus partes, evidenciando el mucílago como materia prima de interés. Tomado de: Food News Latam. (26 de junio de 2020). “Secado de café sin agua le abriría puertas a mercados especiales”. [En línea]. <https://www.foodnewslatam.com/paises/77-colombia/10210-secado-de-caf%C3%A9-sin-agua-le-abrir%C3%ADa-puertas-a-mercados-especiales.html>. [Acceso: febrero 15, 2021].

1.2.1. Fermentación

Por este método de desmucilaginado las pectinas del mucílago de café deben ser removidas, de modo que por este método no es viable una extracción. Los procesos siguientes pertenecen a este método:

1.2.1.i. Fermentación natural o enzimática. En la fermentación natural el mucílago se hidroliza en presencia de enzimas y microorganismos que participan en el proceso como bacterias, levaduras y hongos para degradar las pectinas. Para obtener la mejor calidad de la fermentación natural se debe tener en cuenta los siguientes factores: estado de madurez de la uva, temperatura ambiente, presencia de pulpa en el fermentador y espesor de la capa de fermentación [9].

1.2.1.ii. Fermentación química. Este sistema es similar al desmucilaginado por fermentación natural con la diferencia que se utiliza sustancias químicas como hidróxido de calcio, sulfato ferroso, cloruro de calcio para acelerar la reacción.

1.2.2. Desmucilaginado mecánico

En este método es usado un rotor para hacer girar los granos, en consecuencia, se friccionan entre sí y causa el desprendimiento del mucílago [7]. En la parte externa se encuentra una lámina troquelada por donde se evacua el mucílago y el agua, mientras que el café se obtiene por la parte superior del desmucilaginado. Normalmente el sistema está compactado con la despulpadora para realizar el proceso de forma continua. Por este método el mucílago se adquiere prácticamente puro para su posible utilización en la extracción de pectinas.

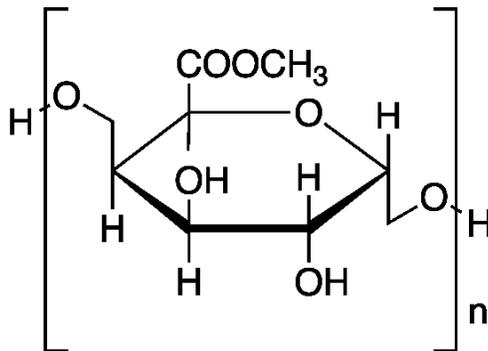
1.3. Generalidades de las pectinas

La pectina es una fibra natural que se encuentra en las paredes celulares de las plantas y alcanza una gran concentración en las pieles de las frutas. El principal componente de las pectinas es el ácido poligalacturónico, el cual se encuentra parcialmente metilado por alcohol metílico y está asociado con azúcares, hemicelulosas, calcio y magnesio. La diversidad de combinaciones de estas sustancias determina las condiciones de extracción y formación de productos de interés según sea el caso. Se estima que aproximadamente materias pécticas totales de la pulpa de café son del 6,52%, mientras que en el mucílago para una especie específica de arábica es del 33%, esto, en comparación a las mayores fuentes de pectinas industriales como lo son los cítricos (3%) y manzana (1,5%), se evidencia un gran recurso de productos pécticos en estos residuos del café [10]. Las propiedades funcionales de las pectinas dependen en gran medida de factores intrínsecos como un peso molecular y grado de esterificación (que a su vez dependen de la materia prima, estado de madurez del fruto y de las condiciones de

fabricación, entre otros), y por factores extrínsecos, tales como el pH, las sales disueltas y la presencia de azúcares. En cuanto al peso molecular de la pectina, que depende directamente de la longitud de la cadena molecular, influye en la solidez del gel producido, es decir, en el poder gelificante de la pectina expresado por convención en grado SAG. Estos grados se definen como el número de gramos de sacarosa que en una solución acuosa de 65° Brix y un valor de pH 3,2 aproximadamente, son gelificados por un gramo de pectina, obteniéndose un gel de una consistencia determinada [2]. Adicional, se encuentran otras caracterizaciones para obtener la mejor pectina, evaluando factores de contenido ácido galacturónico, contenido de metoxilo, grado de esterificación, contenido de acetilo por cromatografía gas-líquido, contenido de nitrógeno, contenido de carbohidratos totales, contenido de humedad, contenido de cenizas totales, contenido de cenizas insolubles en ácidos, determinación del peso equivalente y peso molecular promedio. [10]

Figura 3.

Estructura química de la pectina.



Nota. La figura muestra la unidad básica de la pectina. Tomado de: Lifeder. (28 de noviembre de 2019). "Pectina: estructura, funciones, tipos, alimentos". [En línea]. <https://www.lifeder.com/pectina/>. [Acceso: junio 24, 2021].

1.3.1. Métodos de extracción de pectinas

1.3.1.i. Extracción por hidrólisis ácida. Consiste en un proceso químico por medio de catalizadores ácidos para transformar los polisacáridos, en esta extracción influyen factores como la temperatura, el factor de pH, propiedades del solvente, relación de sólido a disolvente, sólidos secos, tamaño de partícula y velocidad de difusión [11].

La extracción por hidrólisis ácida se da mediante el uso de ciertos catalizadores ácidos (ácido clorhídrico, ácido fosfórico, ácido cítrico, entre otros), en el cual se transforman las cadenas de polisacáridos que forman la biomasa. Este proceso es el método más conocido, sin embargo, antes de realizarlo es necesario realizar una inactivación de las enzimas pécticas, con el objetivo de impedir la degradación del producto de interés (pectina), para esto, se mantiene la materia prima en agua con concentraciones cercanas a 300 g/L y se va calentando hasta ebullición, con el fin de eliminar los microorganismos presentes alrededor de 10 a 15 minutos. Una vez realizado este proceso, se decanta el agua y la materia prima queda lista para el proceso de hidrólisis ácida.[12]

1.3.1.ii. Extracción asistida por ultrasonido. La extracción asistida por ultrasonido (EAU) consiste en el uso de sonidos de alta frecuencia, los cuales ocasionan el desprendimiento de la pectina y el material vegetal, esto es debido a que las partículas líquidas y sólidas vibran y genera una aceleración frente a la acción ultrasónica obteniendo que el soluto pase de su fase sólida al solvente. En este proceso el uso de ultrasonido ocasiona una disrupción celular, causando el colapso de las burbujas de cavitación cerca de las paredes celulares y, provocando así, la intensificación de la transferencia de masa [11]. Para realizar el proceso de extracción, se pueden emplear diversos solventes como agua, ácido cítrico, solución de ácido nítrico y oxalato de amonio.

1.3.1.iii. Extracción asistida por microondas. El método de extracción de pectinas asistida por microondas se basa en el uso del calor generado por la radiación, que al entrar en contacto con las moléculas de la materia prima genera conducción iónica y rotación de dipolos.

La combinación de estos dos mecanismos promueve la liberación de energía causando un calentamiento rápido, como consecuencia se origina el daño del material y el aislamiento rápido de los compuestos de interés.[11] Adicionalmente, las propiedades dieléctricas del solvente, la potencia del microondas, la temperatura y contenido de

humedad del residuo o subproducto son clave para obtener el mejor rendimiento de pectina por este método.[13]

Generalmente, la extracción se comienza colocando la materia prima en un vaso de precipitados con una cantidad específica de agua destilada acidificada a un pH determinado, este pasa al disco giratorio del microondas en el cual se indica una potencia de microondas entre 160–480 Watts y un tiempo de irradiación entre 60–180 segundos según sea el caso teniendo en cuenta el tipo de materia prima. Luego de esperar tiempo seleccionado, se lleva a cabo el proceso de extracción, después se deja enfriar la mezcla en el vaso de precipitados a temperatura ambiente para realizar la filtración y posteriormente centrifugar a 5500 rpm durante 15 min. Por último, se precipita con un volumen igual de etanol al 95% (v / v) y la masa de pectina coagulada se lava con etanol al 95% (v / v) tres veces para eliminar los mono y disacáridos.[13]

1.3.1.iv. Extracción asistida por enzimas. El método de extracción asistida por enzimas es utilizado como alternativa frente a la tecnología convencional pues se puede aumentar la cantidad de pectina obtenida, reduciendo el consumo de energía y cantidad requerida de disolvente, adicionalmente por la especificidad de las enzimas la calidad obtenida de pectina es mayor, sin embargo el costo por este método puede aumentar debido al precio de la enzima seleccionada.[11]

La extracción por medio de enzimas consiste en hidrolizar la matriz de la pared celular, aumentando de esta manera la permeabilidad de la célula y obtener así el compuesto de interés. Regularmente, las enzimas más utilizadas durante este proceso son celulasa, proteasa, hemicelulasa, alcalasa, xilasa, poligalacturonasa, α -amilasa, neutrasa, b-glucosidasa, endopoligalacturonasa y pectinesterasa, adicional a esto el tiempo de reacción, el tipo y concentración de enzima, la temperatura, el valor de pH y el tamaño de partícula del material vegetal son tenidos en cuenta para incrementar el rendimiento de pectina [14]–[16].

1.3.1.v. Extracción por fluidos súper críticos. Para la extracción de pectina es utilizada el agua súper crítica con el fin de que las altas presiones ayuden a ejercer una fuerza sobre las moléculas de agua que pueden infiltrarse en los poros de la matriz vegetal del residuo [17].

Por esta técnica, el agua tiene condiciones de temperatura entre 100°C y 374°C y una presión de 1-22.1 mega pascales [18], en consecuencia la viscosidad, tensión superficial y la constante dieléctrica disminuyen, siendo esta última la más importante pues el agua alcanza valores similares a la constante del etanol o metanol, teniendo de esta manera propiedades de disolvente orgánico.

1.3.1.vi. Extracción por alta presión. Este método consiste básicamente en tres etapas, aumento, mantenimiento y liberación de presión. En la primera etapa se aplica una presión que va desde 100 a 1000 mega pascales con el objetivo de aumentar el diferencial de presión entre la célula vegetal y el medio, causando de esta manera daño y deformación en la pared celular, en la segunda etapa ocurre la penetración del disolvente, por lo tanto, la presión debe mantenerse para lograr el equilibrio entre el interior y el exterior de la célula. Por último, la presión es retirada de manera súbita alterando las interacciones de enlaces no covalentes y provocando una expansión celular que posteriormente aumenta la permeabilidad y así la difusión de fluidos intracelulares en el disolvente [17].

1.3.1.vii. Extracción por métodos híbridos. Consiste en la unión de dos o más métodos con el fin de aumentar el rendimiento obtenido por la extracción, el más usado en la sinergia entre microondas y ultrasonido, sin embargo nuevas tendencias indican el uso de ultrasonido con enzimas y agua súper crítica[17]. La técnica de ultrasonido se acopla muy bien frente a otros métodos debido a que mejoran la transferencia de masa durante el proceso [19].

1.3.2. Caracterización de las pectinas

Las pectinas se clasifican dentro de los ácidos pectínicos, al ser solubles en agua con un contenido medio de éster metílico. Su principal característica es la capacidad de formar geles en presencia de una mayoría de sólidos solubles, ácidos o iones polivalentes. Estas también contienen propiedades fisicoquímicas dadas por:

1.3.2.i. Solubilidad. El agua, la formamida, la dimetilformamida y la glicerina caliente son compuestos en donde la pectina será soluble, siendo el primero el mejor de estos.

En cambio, la pectina será insoluble en solventes orgánicos y en soluciones de detergentes cuaternarios, polímeros y proteínas, ya que son empleados para precipitar la pectina de las soluciones después de un proceso de hidrólisis. [12] De acuerdo a su

solubilidad, las pectinas se pueden caracterizar en tres tipos, las primeras son solubles en agua, esto significa que pueden ser extraídas de tejido vegetal mediante soluciones salinas o agua caliente, las segundas son las protopectinas, las cuales se solubilizan por calor en presencia de ácido o álcali y las últimas son las pectinas solubles en agentes quelantes como EDTA, CDTA, hexametáfosfato, entre otros. [20]

1.3.2.ii. Acidez. Son neutras en su estado natural y ácidas en solución según el medio y el grado de esterificación. Su pH varía entre 2.8-3.4 por este último aporte. [12]

1.3.2.iii. Viscosidad. Forman soluciones viscosas en agua según el grado de polimerización de la pectina, el pH, la temperatura, la concentración y la presencia de electrolitos. Si las pectinas cuentan con alto grado de esterificación, la viscosidad aumentará al aumentar el peso molecular, los grupos laterales, la concentración de la pectina en solución. [12]

1.3.2.iv. Poder de gelificación en geles de pectina. Si las pectinas cuentan con alto metoxilo, se estima que a un pH de 3.4 aproximadamente el 40% de los ésteres metílicos están desesterificados haciendo que la formación de un gel estable sea difícil de lograr. En cambio, en las pectinas de bajo metoxilo, los geles son menos rígidos y pueden trabajarse con menos sólidos solubles ya que se pueden trabajar con pH entre 2.5-6.5. [12]

1.4. Generalidades de biopelícula

Las biopelículas se definen como una capa fina que puede ser utilizada como material de recubrimiento en la industria alimentaria y en general para la sustitución de plásticos. Las biopelículas se producen principalmente a partir de biopolímeros y aditivos que incluyen proteínas, polisacáridos (carbohidratos, gomas y pectinas) y lípidos. Adicionalmente, para mejorar las propiedades mecánicas, se añaden plastificantes como glicerol, monoglicéridos acetilados, polietilenglicol y sacarosa al igual que otros aditivos como emulsificantes durante la producción de estos materiales. [5], [21]

1.4.1. Propiedad mecánica - Fuerza a la tensión

Por medio de la relación entre la fuerza de tensión (N) y la correspondiente extensión o deformación (m) al punto de falla (momento de ruptura de la película) se calcula la resistencia a la tensión de la película. Generalmente se utiliza un texturómetro para realizar el procedimiento [22].

1.4.2. Propiedades físicas

1.4.2.i. Permeabilidad al vapor de agua. La permeabilidad al vapor de agua es la cantidad de vapor de agua que se transmite a través de un material de espesor unidad por unidad de área, unidad de tiempo y se presenta una diferencia de presiones parciales.

1.4.2.ii. Humedad. Es la cantidad de agua que impregna un cuerpo, para las biopelículas se recomienda que esta sea del 5 al 10% de humedad debido a que mayores humedades aumentan la permeabilidad al vapor de agua.

1.4.2.iii. Espesor. Es el grosor de la biopelícula. Es un aspecto de gran importancia debido a que esta propiedad puede llegar a modificar las propiedades tanto mecánicas como de barrera.

1.4.2.iv. Densidad. Es la magnitud que permite medir la cantidad de masa que hay en determinado volumen de la biopelícula.

1.4.2.v. Color. Esta propiedad cualitativamente se puede apreciar mediante un análisis descriptivo, esto con el objetivo de ver el cambio entre las diferentes formulaciones.

1.4.3. Disposiciones legales

1.4.3.i. Resolución 0631 de 2015. Ésta reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 actualizando el Decreto 1594 de 1984 en donde se responde a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país. Este decreto permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país. [23]

1.4.3.ii. Resolución 4143 de 2012. Por la cual se establece el Reglamento Técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos plásticos y elastoméricos y sus aditivos, destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano en el territorio nacional. [24]

1.5. Estimación de costos

La estimación de costos está basada en la viabilidad económica de un proyecto antes de gastar fondos en su puesta en marcha. Generalmente, para desarrollar un estudio de costos generados se tiene en cuenta los siguientes factores: Ubicación de la planta, parámetros de diseño, esquema aproximado del diagrama de flujo de proceso, especificaciones de equipos, sistemas de control, servicios industriales, cantidad y costo

de materia prima y parámetros económicos [25]. Con esta información se realiza un análisis financiero, el cual permite la toma de decisiones por medio de indicadores, entre los más usados se encuentra el valor presente neto, la tasa interna de retorno y la relación costo/beneficio [25].

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección del método de extracción de pectina

2.1.1. Criterios de selección

Actualmente existen diferentes métodos para la extracción de pectinas, en los cuales se encuentran métodos convencionales como la hidrólisis ácida y métodos más innovadores como la extracción asistida por enzimas, microondas, ultrasonido, fluidos súper críticos, alta presión y técnicas híbridas. Es por esto que los criterios mencionados a continuación son esenciales para realizar una adecuada selección del método de extracción.

2.1.1.i. Disponibilidad de equipos. Este criterio fue constituido por la posibilidad de conseguir y disponer de los recursos necesarios en el laboratorio habilitado por la Universidad Santiago de Cali para realizar la extracción de pectina por cualquiera de los métodos, para esto se tomaron en cuenta tanto equipos como reactivos en el análisis de selección. La calificación del criterio va de 1 a 5 donde 5 significa la mayor disponibilidad de equipos y 1 la menor disponibilidad.

2.1.1.ii. Rendimiento obtenido. De acuerdo a Freitas et al. los parámetros que inciden en el rendimiento de la pectina extraída se centran en el pH, el tiempo, el solvente, la temperatura, el área de superficie y la tasa sólido/líquido que existe entre la materia prima y el solvente [26]. Otro estudio realizado por Marena et al., soporta los mismos parámetros de incidencia en el rendimiento de pectina extraída [18], por lo tanto, este criterio fue clave para la selección del método según los rendimientos obtenidos por investigadores anteriores en las diferentes técnicas. La calificación del criterio va de 1 a 5 donde 5 significa el mayor rendimiento obtenido de pectina y en el caso contrario la calificación es de 1.

2.1.1.iii. Costo de implementación del proceso. Conforme a Freitas et al., los altos costos de implementación a nivel industrial influyen en la viabilidad del método [26], por tanto este criterio se basó de acuerdo a los requerimientos económicos que tenía cada método al escalarlo a nivel planta, la importancia del criterio radicó en el cumplimiento de los objetivos 3 y 4. La calificación del criterio tiene una calificación de 1 a 5, en el cual 5 significa el menor costo de implementación a nivel planta.

2.1.1.iv. Revisión bibliográfica obtenida para el mucílago de café. Como afirma Pawadee et al. los parámetros de extracción de pectina dependen de la materia prima y sus propiedades, en consecuencia, es importante tener disponible información acerca de estos factores específicamente para el mucílago de café [27]. La revisión bibliográfica se realizó en la base de datos Scopus, Researchgate y Google académico con las palabras clave en inglés Coffee mucilage, extraction of pectin y en español Agua miel como sinónimo de mucílago de café. La calificación del criterio tiene una calificación de 1 a 5, en el cual 5 significa que se tiene investigación por ese método y 1 que no se ha encontrado ningún antecedente por el método.

2.1.1.v. Consumo de energía. Según Kumar et al., el consumo de energía resulta ser importante a la hora de seleccionar entre los métodos convencionales y los métodos innovadores, ya que este factor influye tanto a nivel experimental como a nivel industrial incidiendo en costos operativos [17]. Este criterio se evaluó realizando una comparación entre cada uno de los métodos de acuerdo al fundamento del cual se basa. La calificación del criterio tiene una calificación de 1 a 5, en el cual 5 significa el menor consumo por ese método y 1 el caso contrario.

De acuerdo a la descripción de criterios se realizó una tabla de ponderación (Tabla 1) en la cual se dieron valores según la importancia y la incidencia de costos al proyecto.

Tabla 1.
Ponderación de criterios de selección de método de extracción.

Criterio	Ponderación	Método ideal	
		Calificación	Evaluación
Disponibilidad de equipos	0.3	5	1.5
Rendimiento obtenido	0.2	5	1
Costo de implementación del proceso	0.1	5	0.5
Revisión bibliográfica obtenida para el mucílago de café	0.3	5	1.5
Consumo de energía	0.1	5	0.5
Total	1	-	5

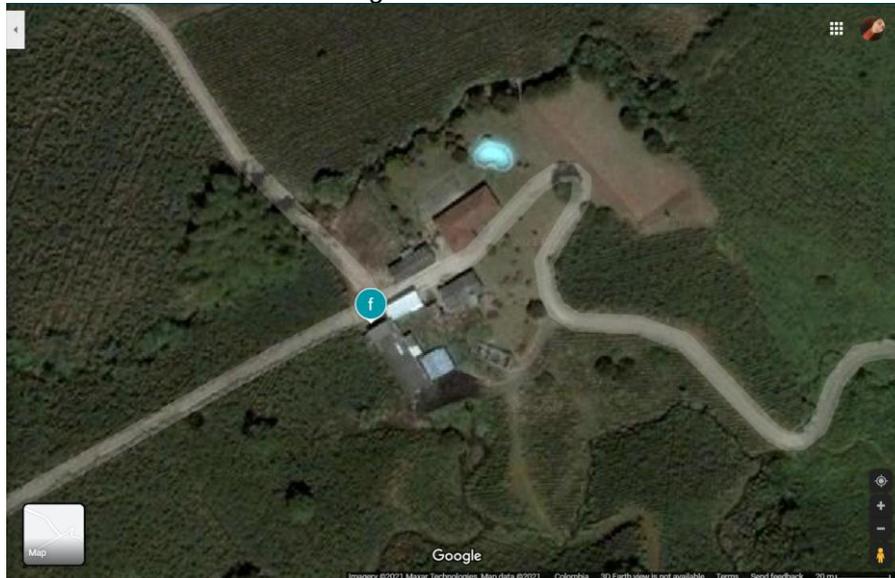
Nota. La tabla describe la ponderación para cada uno de los criterios seleccionados y cuál es la más alta calificación según el método ideal.

Mediante la multiplicación de la ponderación y la calificación que obtuvo cada método, se tiene una evaluación tomada en cuenta en la decisión de selección de este.

2.1.2. Obtención de materia prima

2.1.2.i. Localización. La finca la Argelia se encuentra ubicada en Palomino cerca de Sevilla-Valle del Cauca con las siguientes coordenadas $4^{\circ}19'45.9''N$ $75^{\circ}53'12.4''W$.

Figura 4.
Localización de la finca La Argelia.



Nota. Se observa la geolocalización de la finca la Argelia donde se obtuvo la muestra de mucílago de café. Tomado de: Google Maps.

2.1.2.ii. Manejo de la materia prima. El mucílago de café fue recolectado de la finca La Argelia Sevilla-Valle del Cauca donde se realiza el proceso de beneficiado de café por desmucilaginado mecánico utilizando el desmucilagador BELCOSUB modelo 2500GAVIOTA observado en la Figura 6, el cual utiliza 0.6 litros de agua por cada kilogramo de café que se trata. El residuo obtenido es una mezcla entre el mucílago de café y agua denominado agua miel.

Figura 5.

Proceso de beneficiado de café en la Finca La Argelia.



Nota. Equipos utilizados en la Finca La Argelia para realizar el proceso de beneficiado de café

Figura 6.

Desmucilagador mecánico utilizado en la Finca La Argelia.



Nota. La imagen muestra el desmucilagador donde se recolecto la muestra de agua miel La muestra fue recolectada en recipientes de plásticos higienizados en baño térmico a 80°C; una vez fue obtenida la muestra se transportó en una nevera refrigerada con un

Ice Pack hacia el laboratorio, la muestra no utilizada se llevó a un refrigerador a condiciones de temperatura de 4°C, esto con el fin de retrasar la velocidad de degradación y conservar las características propias del mucílago que permiten obtener el rendimiento de pectina según Ríos [4].

2.1.2.iii. Caracterización de materia prima. Las propiedades del mucílago de café dependen de factores como el tipo de café, la zona de producción y la época en la que es recolectado. Al llegar al laboratorio el mucilago fue caracterizado evaluando su pH, °Brix y temperatura.

La medición de pH fue determinado por la norma ASTM D1293-18 [28], en la cual se lava el electrodo y se agita la muestra antes de su medición, fue utilizado un pH metro Orion Star modelo A211. Los grados °Brix fueron establecidos por un refractómetro de mano HR-serie con escala de precisión de 0 a 32%, teniendo en cuenta la norma ASTM D1218-12[29], en donde se limpió el prisma para introducir la muestra, esperando 3 minutos para observar por el ocular.

Adicionalmente se realizó el recuento de microorganismos indicadores que pueden hallarse desde la recolección del café, entre estos posibles organismos se encuentran: mohos y levaduras, mesófilos aerobios, enterobacterias y coliformes totales.

El análisis fue efectuado bajo la dirección de laboratorios de la Universidad Santiago de Cali en el laboratorio de microbiología como un servicio contratado de ensayos de laboratorio, los métodos utilizados fueron bajo las normas NTC 4519 para mesófilos aerobios, NTC 5733 para enterobacterias, ISO 4832 para coliformes totales y NTC 5698-1 para mohos y levaduras.

2.1.3. Extracción de pectina de mucílago

La pectina fue extraída conforme a la metodología reportada en el artículo de Jessica García [20] y Héctor Mendoza[2] con algunas modificaciones. El pretratamiento de la materia prima (mucílago de café) fue realizado mediante una filtración con embudo de plástico, ya que esta contenía solidos gruesos considerables. Luego, se procedió a realizar una disolución con agua acidificada con ácido sulfúrico a 35% de concentración manteniendo unas condiciones de pH de 3.5, temperatura de 70°C y una duración de 45 minutos. La muestra de mucilago tenía un pH inicial de 4.72, en consecuencia, 3ml

aproximadamente de H₂SO₄ fueron empleados para acercar el pH a 3.5 en una solución de 500ml.

Las condiciones de pH, temperatura y tiempo de agitación a velocidad constante de hidrólisis fueron seleccionadas de acuerdo a la revisión bibliográfica del método relacionado con el mucílago de café. Posteriormente, luego de finalizar el tiempo de agitación, se aumentó el pH a 4 con ayuda de una solución de NaOH 1M agitando uniformemente para dejarlo enfriar hasta una temperatura de 35°C, aproximadamente se utilizaron 5 ml de solución de NaOH por cada 500ml de agua miel. Estas condiciones reflejan una mayor estabilidad en la solución por tanto se puede obtener un rendimiento adecuado, de igual manera la evaluación descrita se puede ver soportada por Mariana Valdestino, et al. [30] y por García, Arriola et al. [31] donde se evidenció que no han ocurrido cambios significativos en las variables para obtener el mayor rendimiento de pectina.

Enseguida de la extracción, se realizó una filtración con el fin de separar el extracto acuoso de pectina del residuo vegetal. La eficiencia de este proceso depende de una baja viscosidad y la no pulverización de los sólidos (consecuencia de una excesiva agitación). Para este proceso se empleó una bomba de vacío y gasa estéril como filtro.

Posteriormente, fue necesario precipitar el filtrado con alcohol con el fin de eliminar las impurezas; para esto, la FAO y USP recomiendan el uso de metanol, etanol e isopropanol [32]. Sin embargo, la mejor opción fue el uso de etanol al 95% ya que presenta ventajas como la fácil recuperación en la solución. Una vez, establecida la mezcla 1:1 se agrega el etanol, agitando manualmente a ritmo constante durante 10 minutos para luego dejar reposar un tiempo de 48 horas hasta poder observar un precipitado en tono café en la fase líquida [2]. Luego de precipitada la pectina, se llevó a cabo una purificación mediante un lavado con etanol al 95%, terminando de retirar las impurezas solubles en el precipitado péctico. El diagrama general del proceso empleado para la obtención de pectina se encuentra en el Anexo 1.

2.1.4. Caracterización de pectina extraída

2.1.4.i. Determinación de solubilidad. Conforme a lo reportado por Jessica García [20], este factor es importante en el ámbito industrial debido a que se comercializa en forma de solución concentrada, sin embargo, en pruebas de calidad realizadas y comparadas según las especificaciones FAO y USP, este se designa solamente como positiva o negativa [32]. Al evaluar la extracción realizada por varios autores y los métodos empleados, se determina que la pectina a obtener es soluble en agua, en donde los factores que alteran son los grupos carboxílicos esterificados, el peso molecular, el pH, la temperatura y la naturaleza de la materia [20], [33]. Para esto, se agregó 0.5 g de pectina a 100 ml de agua destilada, agitando de manera vigorosa, una vez finalizada la agitación se observa una solución coloidal, viscosa y opalescente, lo que indica la solubilidad positiva, en caso contrario será negativa.

2.1.4.ii. Determinación del peso equivalente y acidez libre. Para la determinación de estos factores, es necesario seguir la metodología planteada por Owens et al. en el año 1952 [34], la cual no ha tenido variaciones y sigue siendo una técnica efectiva que han empleado diferentes autores alrededor de este tema. Esta técnica indicó tomar un vidrio de reloj con una muestra de 500 mg de pectina extraída, para adicionarla a un Erlenmeyer de 250 ml junto con 5ml de alcohol de 95-96%, luego, se adicionaron 100 ml de agua destilada y finalmente, se realizó una titulación con Hidróxido de Sodio (NaOH) 0.1 mol/L, utilizando como indicador, 4 gotas de rojo de fenol. Estas determinaciones se calcularon relacionando el peso de la muestra en mg y los miliequivalentes del hidróxido de sodio gastados en la titulación, como se muestra a continuación:

Ecuación 1

$$\text{Peso equivalente (Pe)} = \frac{\text{mg de componente ácido}}{\text{meq (A)NaOH}}$$

Ecuación 2

$$\text{Acidez libre (A)} = \frac{\text{meq (A) NaOH}}{\text{g de componente ácido}}$$

Donde:

Componente ácido: mg de pectina o g de pectina

Meq (A) NaOH: meq de NaOH utilizados en la titulación

2.1.4.iii. Determinación del porcentaje de metoxilo. Según Owens et al., [34] el procedimiento para precisar el porcentaje de metoxilo se lleva a cabo con la solución empleada en la determinación de peso equivalente y acidez libre, posteriormente se agregó 25 ml de hidróxido de sodio, agitando perfectamente, una vez esta solución reposa por 30 minutos a temperatura ambiente, se adicionaron 25 ml de la disolución de ácido clorhídrico 0.25N, por último se agitó y se realizó una titulación utilizando hidróxido de sodio a 0.1N. [12], [35]. El porcentaje de metoxilo se calculó de la siguiente forma.

Ecuación 3

$$\%metoxilo = \frac{meq NaOH * PM metoxilo}{peso muestra (mg)} * 100$$

2.1.4.iv. Determinación del grado de esterificación. Conforme a Owens et al., [34] el grado de esterificación se calculó relacionando los miliequivalentes gastados en la titulación de determinación del porcentaje de metoxilación y la suma del total de los miliequivalentes gastados en la titulación de acidez libre y porcentaje de metoxilación, de la siguiente manera:

Ecuación 4

$$\%Grado esterificación (Ge) = \frac{meq NaOH (metóxilo)}{meq NaOH (acidez) + meq NaOH (metoxilo)} * 100$$

2.2. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la biopelícula obtenida a diferentes concentraciones de pectina de mucílago de café

Previamente a la elaboración de películas a partir de pectina extraída de mucílago de café, se realizaron pruebas previas con pectina cítrica para comparar las concentraciones de pectina utilizadas por los autores revisados y comprobar la formación de la matriz polimérica a partir de pectina, plastificante, aceite mineral y tween 80. Las concentraciones de pectina fueron 2% p/v, 4% p/v y 6% p/v de acuerdo a lo estudiado por David López et al., [36] para el plastificante se toman como concentración de prueba 1 y 1.5% p/v según Younis et al y Rosida et al [37], [38] y para el aceite mineral y el tween 80 se toma 5% v/v y 0.1% v/v respectivamente acorde con David López et al y Diana Moncayo [36], [39]. Posteriormente, se evaluó pruebas sin aceite mineral y sin

tween 80 con las mismas concentraciones anteriormente mencionadas para pectina y glicerol.

Más adelante, al tener los resultados de las pruebas previas, fue ejecutada una prueba cualitativa para determinar cuál película de acuerdo a su color y espesor consideraban la concentración de pectina y glicerol propia para la formación de película, de igual forma si esta requirió de aceite mineral y tween 80. Con esta inspección se dió paso a la elaboración de películas de pectina extraída de mucílago de café a la concentración de pectina y glicerol seleccionadas por 10 repeticiones, ya que 5 de ellas fueron usadas para la prueba de permeabilidad al vapor de agua y las restantes para la prueba de fuerza a la tensión. De igual forma, se realizaron películas con la concentración seleccionada de pectina cítrica para su posterior comparación con su igual de pectina de mucílago, así mismo, se realizaron películas compuestas con la misma concentración de pectina utilizando un 50% de pectina cítrica y un 50% de pectina de mucílago de café. Esto se evaluó a partir del diseño experimental de un factor presentado en la tabla 2.

Tabla 2.

Diseño de experimentos planteado.

Tipo de pectina		
Pectina Mucílago	Pectina Cítrica	Pectina compuesta
% seleccionado	% seleccionado	% seleccionado

Nota. La tabla muestra el diseño de experimentos planteado para el proyecto

La pectina cítrica fue de tipo comercial, la pectina de mucílago fue extraída por el método con mayor calificación en el apartado 3.1.1.vi. Adicionalmente, el glicerol, aceite mineral y tween 80 utilizados para las pruebas previas y el diseño experimental fue obtenido de Todo Químicos del Quindío en la ciudad de Armenia-Quindío.

En el Anexo 1 se encuentra el diagrama de proceso empleado para la elaboración de la solución formadora de película.

2.2.1. Caracterización de películas de pectina

2.2.1.i. Determinación de permeabilidad al vapor de agua. La permeabilidad al vapor de agua fue medida según la norma ASTM E96-00 por el método de desecante, introduciendo en un pesafiltro 3 g de silica gel, posteriormente en la boca del pesafiltro se coloca la película correspondiente, ajustándola con la ayuda de un O-ring y papel aluminio, luego se pesa el pesafiltro para obtener el dato de W_0 e inmediatamente las muestras son llevadas a un ambiente controlado donde la humedad es del 68-84% y la temperatura de 28-35°C. El peso es registrado a la 1,2,4,8,16,24 horas después de dejar la muestra, por último se realiza un gráfico de peso ($W_t - W_0$) vs tiempo, y con las ecuaciones 5 y 6 se calcula la regresión lineal y se obtiene el valor de la permeabilidad al vapor de agua[40].

Ecuación 5

$$WVT = \frac{G}{t * A} = \frac{(G/t)}{A}$$

Donde:

WVT = Tasa de transmisión de vapor

(G/t) = Pendiente de la recta

A= Área de transferencia de vapor de agua

Ecuación 6

$$Permeabilidad = \frac{WVT}{\Delta P} = \frac{WVT}{S (R1 - R2)} * e$$

ΔP = Diferencia de presión de vapor de agua entre la atmósfera de la silica gel y la de la cámara controlada

S= Presión de saturación de vapor a la temperatura testada

R1= humedad relativa de la cámara

R2= humedad relativa en el sumidero

e= Espesor

2.2.1.ii. Determinación de Fuerza a la tensión. Esta fue determinada de acuerdo a la norma ASTM D882-18 [41] la cual indica la determinación de propiedades de tracción de los plásticos en forma de láminas delgadas y películas (menos de 1,0 mm (0,04 pulg.) de espesor). Las películas se formaron en rectángulos de 120 mm x 40 mm. La separación de agarre inicial fue de 125 mm y la tasa de agarre la separación fue de 12,5 mm / min. Los parámetros determinados fueron la carga máxima de rotura (MPa), y extensión de la longitud en la ruptura (%). La resistencia a la tracción (TS) y el porcentaje de elongación (% E) para cada película se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones 8 y 9.

Ecuación 7

$$TS = \frac{\text{Carga máxima a la rotura}}{\text{Área de sección transversal}}$$

Ecuación 8

$$\%E = \frac{\text{Longitud de extensión a la ruptura}}{\text{Longitud inicial}} * 100$$

2.3. Descripción de las especificaciones técnicas y condiciones del proceso a nivel planta piloto

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre proyectos e investigaciones que incluyeran el diseño de una planta piloto tanto para la extracción de pectina por hidrólisis ácida como para la elaboración de biopelículas por el método casting continuo teniendo en cuenta que para la materia prima empleada (mucílago de café) aún no se encuentra un trabajo que incluya ambos procedimientos, se realizó cada investigación por aparte y se unificó en el diagrama de proceso. Una vez especificados los artículos seleccionados se realizó una división de los equipos y materiales que se necesitaron para cada proceso en la planta teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de estos y la definición de una base de cálculo de 7425 kg mucílago/día según reporte de Cenicafé, en donde el mucílago representa el 14.85% en peso del fruto fresco[3] y el dato indicado por la Finca La Argelia para el cual en tiempos de cosecha se obtienen 50000 kg café/día; todo esto con el fin de obtener una cantidad específica de pectina extraída y de biopelículas para finalmente elaborar un diagrama de proceso que incorporó las condiciones operativas.

2.4. Estimación de los costos generados en la extracción de pectinas de mucílago de café y la elaboración de biopelículas

Para efectuar la estimación de costos, se tuvo en cuenta el apartado 2.3, en donde una vez elegidos los equipos de operación de los procesos más relevantes y sus especificaciones técnicas, se procedió a buscar en distintos medios electrónicos de empresas fabricantes de equipos un precio estimado para el cual se escogieron los equipos económicamente más adecuados para el proceso. Posteriormente, se realizó mediante una tabla el valor total de los equipos para la planta piloto de producción.

Adicionalmente, se efectuó un estudio de factibilidad en donde se buscó evaluar la planta piloto por medio de un estudio financiero pretendiendo determinar cuál es el monto de estos costos y la logística de la materia prima (mucílago de café), así como los costos de insumos necesarios para el proceso de elaboración, todo esto mediante un flujo de efectivo. Esta determinación se evaluó finalmente, por medio de indicadores financieros como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación costo beneficio (C/B) [42].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

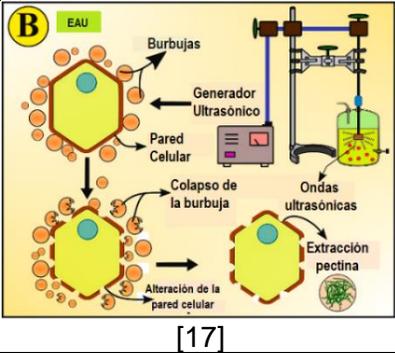
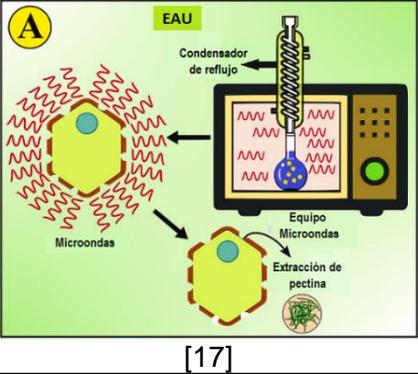
3.1. Selección de método de extracción

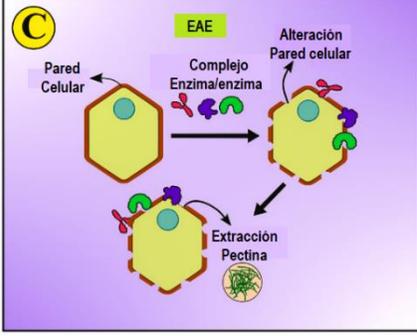
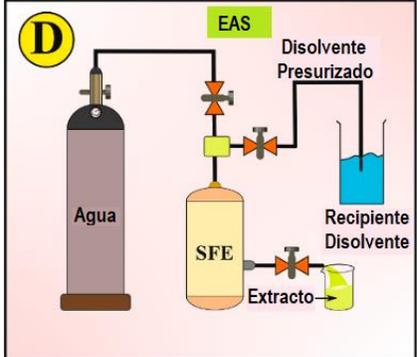
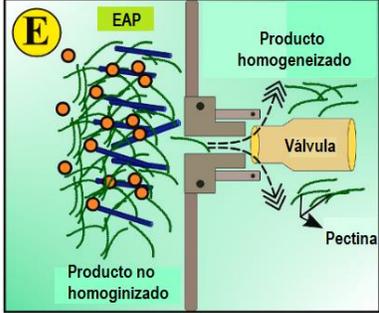
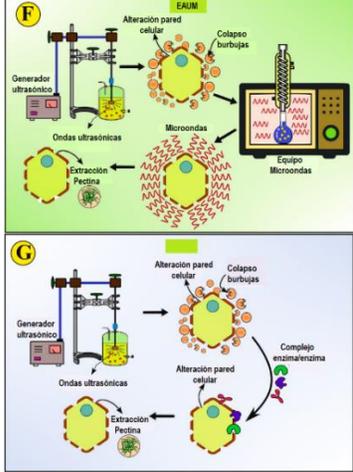
3.1.1. Análisis de criterios de selección

3.1.1.i. Disponibilidad de equipos. En la Tabla 3 se describen los equipos que se emplearán en cada método de extracción junto con la calificación dada a estos según la facilidad de disponer de estos en el laboratorio.

Tabla 3.

Descripción del equipo empleado según método extracción.

Método	Esquema de operación	Descripción	Cf.
Extracción por hidrólisis ácida		El equipo utilizado a nivel laboratorio comúnmente consta de un beaker o erlenmeyer sobre una plancha de calentamiento, la cual transfiera calor y con ayuda de un agitador y termómetro se controla la temperatura para llevar a cabo la separación de pectina de los tejidos vegetales durante un tiempo estimado junto con la adición del agente extractor que en este caso son ácidos fuertes.	5
Extracción asistida por ultrasonido		Se requiere un equipo especializado, pues es necesario un generador ultrasónico para provocar el fenómeno de cavitación acústica, el cual genera burbujas y estas se colapsan causando alteración en la pared celular y así una mejor penetración del solvente que precipita la pectina.	3
Extracción asistida por microondas		Para este método es utilizado un montaje de un microondas convencional con una modificación en el centro. En esta apertura se emplea un sistema de reflujo que tiene contacto directo con el reactor para mantener la relación solido: solvente [43].	4

<p>Extracción asistida por enzimas</p>		<p>En este método se emplea el uso de enzimas para catalizar la hidrólisis, lo que resulta en una reducción de la cantidad de solvente adicionado para precipitar la pectina. El montaje de equipos es similar al método convencional por hidrólisis ácida. Las enzimas más utilizadas son la pectinasa, la xilanasa, B-glucosidasa y B-glucanasa</p>	<p>5</p>
<p>Extracción por fluidos supercríticos</p>		<p>El equipo utilizado consiste en un tanque de agua, compresor, válvulas, extractor, recipiente de cosolvente y bomba. Este equipo es especializado pues maneja condiciones de temperatura y presión súper críticas para realizar el arrastre del producto de interés[44].</p>	<p>2</p>
<p>Extracción por alta presión</p>		<p>Se requiere un equipo que soporte altas presiones, controlándolas mediante el uso de una válvula ya que el proceso se da en tres etapas: aumento, mantenimiento y liberación de presión.</p>	<p>3</p>
<p>Extracción por métodos híbridos</p>		<p>Para este método que tiene sinergia entre dos o más técnicas se van a requerir los equipos empleados en cada uno de estos.</p>	<p>1</p>

Nota. La tabla muestra como apoyo una ilustración de cada método, la descripción del equipo que emplea cada uno y una calificación al criterio de las investigadoras.

3.1.1.ii. Rendimiento obtenido. Los diferentes métodos de extracción de pectinas han sido estudiados por diferentes autores con diseños metodológicos similares, se acoplan las investigaciones en la Tabla 4, descrita a continuación mostrando los rendimientos (Rnd) para cada uno de los métodos con su respectiva calificación (Cf).

Tabla 4.

Revisión bibliográfica compilada sobre métodos de extracción.

Método Extracción	Título	Autor (es)	Rnd.	Cf.
Hidrólisis Ácida (CE): el método más empleado en la industria por su facilidad de operación, sin embargo toma un periodo de tiempo extenso para obtener los mejores rendimientos[45], durante este periodo de calentamiento puede causarse inestabilidad en la cadena principal de la pectina ocurriendo una despolimerización, es decir se puede llegar a descomponer[46]	Comparisons of process intensifying methods in the extraction of pectin from pomelo peel [47]	Shan Qin Liew, Wen Hui Teoh, Rozita Yusoff, Gek Cheng Nghoh	<ul style="list-style-type: none"> • CE: 39.13% p/p • UMAE: 36.33% p/p • SWE LM: 19.63% p/p 	4
	Pectin from carrot pomace Optimization of extraction and physicochemical properties[48]	Faeghe Jafari, Faramarz Khodaiyan, Hossein Kiani, Seyed Saeid Hosseini	15.6% p/p de orujo de zanahoria	
	Optimization of pectin extraction from banana peels with citric acid by using response surface methodology[49]	Tulio I. S Oliveira, Morysleide De Freitas Rosa, Fabia Lima Cavalcante, Paulo H.F. Pereira	14,2% p/p de cascara de plátano	
	Evaluación del rendimiento de extracción de pectinas en aguas mieles del beneficiado de café procedentes de desmucilaginado mecánico[20]	Jessica Ivette García Palma	0.224% p/p de agua miel	
	Extracción de pectinas a partir de mucílago contenido en las	Héctor Armando Mendoza Yalibat	<ul style="list-style-type: none"> • H2SO4: 2.14% p/p • C4H6O6: 1.57% p/p 	

	aguas mieles del beneficiado de café por maceración dinámica y estática[2]		<ul style="list-style-type: none"> • C6H8O7: 0.94% p/p 	
<p>Asistida por Ultrasonido: En el proceso de extracción asistida por ultrasonido se obtienen varios beneficios como lo es el corto tiempo empleado para el tratamiento, requiere de pocos solventes y, al ser una tecnología no térmica, conviene al medio ambiente.[11] Adicionalmente, varios estudios ven beneficiosa esta técnica ya que se genera una reducción en el tiempo de extracción, se pueden llegar a obtener mayores rendimientos y mayor calidad en cuanto a las características del material extraído. Algunas extracciones realizadas mediante EAU son en vainas de guisantes, cáscara de maracuyá, cladodios de nopal y desechos de tomate[50]–[53] [50]–[53]en donde éstas pectinas extraídas por este método destacan por su contenido en ácido anhidrouónico, metoxilo y grado de esterificación</p>	<p>Citrus pectin obtained by ultrasound-assisted extraction: Physicochemical, structural, rheological and functional properties[50]</p>	<p>Erik Polanco Lugo, José Isabel Martínez Castillo, Juan Carlos Cuevas Bernardino, Tania Gonzalez Flores, Ruby Valdez Ojeda, Neith Pacheco, Teresa Ayora Talavera</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mandarina: 26.05% p/p • Pomelo: 13.46% p/p 	5
	<p>Extraction of pectin from passion fruit peel assisted by ultrasound[52]</p>	<p>Cibele Freitas de Oliveira, Diego Giordani, Rafael Lutckemier, Poliana Deyse Gurak, Florencia Caldera Olivera, Ligia Damasceno Ferreira</p>	<p>12% p/p de pectina de maracuyá</p>	
	<p>Ultrasonic extraction of pectin from Opuntia ficus indica cladodes after mucilage removal: Optimizarion of experimental conditions and functional properties.[51]</p>	<p>Nadia Bayar, Tahani Bouallegue, Mabrouka Achour, Mouna Kriaa, Ali Bougatef, Radhouane Kammoun</p>	<p>18.14% p/p de pectina de nopal</p>	

<p>Asistida por Microondas (MAE): Este método físico tiene como fundamento el uso de la energía de microondas para conseguir que los compuestos de interés pasen rápidamente de la muestra a un disolvente adecuado, lo que permite el control de una serie de parámetros que afectan a la eficacia de extracción y el uso reducido de solvente[33]. De acuerdo a Marenda et al. esta tecnología maneja bajas temperaturas, calentamiento homogéneo, corto tiempo de operación e incrementa el rendimiento[18].</p>	<p>Extraction and Characterization of Pectin from the Fruit Peel of Opuntia Robusta[54]</p>	<p>Jaquelinne Mota, Claudia Muro, Javier Illescas, Omar A. Hernández, Alberto Tecante y Ernesto Rivera</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pectina I (MAE): 14.64% p/p • Pectina II (CE): 15.71% p/p 	5
	<p>Co-optimization of pectin and polyphenols extraction from black mulberry pomace using and eco-friendly technique: Simultaneous recovery and characterization of products[55]</p>	<p>Faramaraz Khodaiyan, Karim Parastouei</p>	<p>10.95% p/p de pectina de mora negra</p>	
	<p>Microwave assisted extraction of pectin from waste Citrullus lanatus fruit rinds[13]</p>	<p>J. Prakash Maran, V. Sivakumar, K. Thirugnanasa mbandham, R. Sridhar</p>	<p>25.79% p/p de pectina de sandia</p>	
<p>Asistida por Enzimas: Para este método, el rendimiento se afecta según la concentración de la enzima que se utilice, sin embargo requiere un periodo largo de tiempo pues se trabaja a un pH medio, en comparación al método convencional se reduce el uso de solvente pero tiene menores rendimientos[18].</p>	<p>Optimization of enzymatic hydrolysis conditions for extraction of pectin from rapeseed cake (Brassica napus L.) using commercial enzymes[14]</p>	<p>Han-Seob Jeong, Ho-Yong Kim, Sye Hee Ahn, Sei Chang Oh, In Yang, In-Gyu Choi.</p>	<p>6.85% p/p de pectina con Celluclast-Alcalase</p>	3
	<p>Optimization of enzymatic extraction of pectin from Opuntia ficus indica cladodes after mucilage removal[56]</p>	<p>Nadia Bayar, Marwa Friji, Radhouane Kammoun</p>	<p>17.91% p/p de nopal</p>	
	<p>Enzymatic extraction of pectin from passion fruit</p>	<p>Juliana Vasco Correa, Arley</p>	<p>17-26% p/p de pectina de</p>	

	peel (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>flavicarpa</i>) at laboratory and bench scale[57]	D. Zapata Zapata	cáscara de maracuyá	
<p>Fluidos Supercríticos (SFE):</p> <p>Se deben mantener controladas las variables de presión y temperatura a las que se emplea el fluido, sin embargo, la el tiempo que se emplee en la extracción puede afectar mayoritariamente a la temperatura cobrando mayor afectación en el rendimiento.</p>	Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water[58]	Xing Wan, Quanru Chen, Xin Lu	<ul style="list-style-type: none"> • Cáscara de cítricos: 21.95% p/p pectina • Orujo de manzana: 16.68% p/p pectina 	3
	Structural characterisation of pectin obtained from cacao pod husk. Comparison of conventional and subcritical water extraction[59]	Almagro Negrea Muñoz, Carmona Valadez Lourdes, Jose A. Mendiola, Elena Ibañez, Marr Villamiel	10.9% p/p de pectina de cáscara de mazorca de cacao	
	Extraction of Low Methoxyl Pectin from Fresh Sunflower Heads by Subcritical Water Extraction[60]	Xuemei Ma, Jing Jing, Jingbao Wang, Jingjing Xu, and Zhiyong Hu	6.57% p/p de cabezas de girasol	
<p>Alta Presión (HP): El rendimiento está muy ligado con el cambio estructural producido al momento de inducir alta presión a la célula vegetal pues genera una etapa de estrés en donde es capaz de romperla liberándose la pectina.</p>	Extraction of pectin from sugar beet pulp by high hydrostatic pressure and investigation of extraction efficiency and extract characteristics[61]	Burcu Kaya	<ul style="list-style-type: none"> • HP: 12.09% p/p • CE: 6.43% p/p 	3
	Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: A comparison[62]	Xingfeng Guo, Dongmei Han, Huping Xi, Lei Rao, Xiaojun Liao, Xiaosong Hu, Jihong Wu	<ul style="list-style-type: none"> • HP: 20,44% p/p • CE: 15,47% p/p • MAE: 18,13% p/p 	

	Sustainable production of pectin from lime peel by high hydrostatic pressure treatment[63]	Mahsa Naghshineh, Karsten Olsen, Constantinos A. Georgiou	18.6-26.5% p/p de cáscara de lima	
Extracciones Híbridas: Mejora el rendimiento por la reducción del tiempo y la eficiencia en la sinergia de procesos de extracción.	Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process[64]	Yishuo Yang, Zhaomei Wang, Die Hu, Kaijun Xiao, Jian-Yong Wu	<ul style="list-style-type: none"> • Enzima/Ultrasonido: 14.6% p/p pectina de sisal • Enzimática: 9.4% p/p • Ultrasónica: 11.9% p/p • CE: 5.8% p/p 	5
	Properties and extraction of pectin-enriched materials from sugar beet pulp by ultrasonic-assisted treatment combined with subcritical water[65]	Hai-ming Chen, Xiong Fu, Zhi-gang Luo	24.63% p/p de pectina de remolacha azucarera	
	Combined Effect of High-Pressure and Conventional Heating on Pectin Extraction from Passion Fruit Peel[66]	Cibele Freitas de Oliveira, Poliana Deyse Gurak, Florencia Cladera-Olivera, Ligia Damasceno Ferreira Marczak, Mukund Karwe	HP: 14.34% p/p de cáscara de maracuyá	

Nota: Esta tabla muestra trabajos y artículos de investigación sobre los métodos de extracción y su comparación con los rendimientos según cada objetivo.

3.1.1.iii. Costo de implementación del proceso. Las nuevas tecnologías tiene limitaciones en cuanto a la aplicación industrial, pues la inversión en relación con los equipos, mantenimiento y el personal capacitado en algunas de estas es alta [18].

A continuación, se muestra la calificación (Cf) dada para cada uno de los métodos

Tabla 5.

Costos de implementación de los métodos de extracción.

Método de extracción	Costo de implementación	Cf
Hidrólisis acida	Bajo costo en los equipos empleados, el mantenimiento aumenta los costos porque puede existir alta corrosión y el personal capacitado no requiere una inversión mayor[67].	4
Asistida por ultrasonido	Bajo Costo en los equipos, mantenimiento y personal capacitado sin embargo se aumentan los costos en el tratamiento de efluentes[18]	4
Asistida por microondas	Altos costos de mantenimiento pues no elimina totalmente los solventes[67], por lo tanto existe corrosión en equipos, además requiere del tratamiento de efluentes, sin embargo los equipos en el diseño permiten ser de menor tamaño[18].	3
Asistida por enzimas	Bajo costos en equipos, mantenimiento y capacitación de personal, debido a que reduce el uso de solvente y por lo tanto la corrosión de equipos, adicional existe facilidad en el tratamiento de efluentes[18]. El costo de la enzima es parcialmente compensado con la reducción del costo del ácido y el mantenimiento de equipos [67].	4
Por fluidos súper críticos	Alto costo de equipos a utilizar, ya que se requieren grandes cantidades de fluido supercrítico que deben llegar a un presión y temperatura específica, la escalación sigue aún en estudio para extracción de pectinas [67].	2
Por alta presión	Alto costo en equipos para mantener la presión necesaria para extraer pectina y la inversión en personal capacitado aumenta.	2
Por métodos híbridos	Alto costo pues se requiere la combinación de equipos empleados en cada uno de los métodos y el personal capacitado debe tener mayor inversión para operar correctamente los equipos.	1

Nota. En esta tabla se realiza una comparación en los costos de equipos, mantenimiento, personal capacitado y tratamiento de efluentes de cada uno de los métodos con la respectiva calificación dada por las autoras.

3.1.1.iv. Revisión bibliográfica obtenida para el mucilago de café. Se realizó la revisión bibliográfica planteada en la metodología y se recopilaron los trabajos de grados y artículos acordes con la materia prima. A continuación, se da una breve descripción:

Conforme a Jessica García, en su trabajo de grado titulado “Evaluación del rendimiento de extracción de pectinas en aguas mieles del beneficiado de café procedentes de desmucilaginado mecánico”, realiza un extracción por hidrólisis ácida usando como solvente ácido clorhídrico para obtener pectina de las aguas mieles del desmucilaginado mecánico, como resultado se evidenció un mayor rendimiento con unas variables de temperatura a 70 °C, pH de 3.5 y un tiempo de 40 min; a su vez, la pectina extraída contenía bajo metoxilo (6.03%), alto contenido en ácido poligalacturónico(95.36%), humedad de 9.9%, pH de 4.02 y solubilidad en agua, cumpliendo de esta manera con las especificaciones establecidas para una pectina comercial dictadas por la FAO, en donde se debe obtener como mínimo un porcentaje de 65% en ácido galacturónico y máximo 12% de humedad.[20]

Acorde con Héctor Mendoza, en su trabajo de grado titulado “EXTRACCIÓN DE PECTINAS A PARTIR DE MUCÍLAGO CONTENIDO EN LAS AGUAS MIELES DEL BENEFICIADO DE CAFÉ POR MACERACIÓN DINÁMICA Y ESTÁTICA”, realiza una extracción por hidrólisis ácida variando el solvente empleado entre ácido cítrico, tartárico y sulfúrico, obteniendo el mayor rendimiento con ácido sulfúrico para el cual fue del 20.98% a condiciones iguales al trabajo descrito anteriormente.[2]

Finalmente, Mariana Valdespino et al. evaluó la valorización del mucilago de café como fuente de pectina para películas biodegradables, la composición de pectina de mucilago de café fue caracterizada mediante el contenido de ácido galacturónico, grado de esterificación, porcentaje de acidez, peso equivalente, porcentaje de metoxilo y difracción de rayos x. La pectina fue extraída por método de hidrólisis ácida[30].

Teniendo en cuenta lo anterior el único método hasta ahora por el cual ha sido extraída la pectina de mucilago de café es por hidrólisis ácida según los informes publicados, por lo tanto, en la Tabla 6 se muestra la calificación para evaluar el criterio.

Tabla 6.

Calificación del método de extracción según revisión bibliográfica.

Método de extracción	Calificación
Extracción por hidrólisis acida	5
Extracción asistida por ultrasonido	1
Extracción asistida por microondas	1
Extracción asistida por enzimas	1
Extracción por fluidos súper críticos	1
Extracción por alta presión	1
Extracción por método híbridos	1

Nota. Esta tabla muestra la calificación de cada método según las investigaciones realizadas para el mucílago de café.

3.1.1.v. Consumo de energía. El consumo de energía es importante pues entre menor sea la demanda energética, el proceso se considera amigable para el medio ambiente, por lo tanto, en la tabla 7 se observa el consumo de energía los métodos de extracción y su respectiva calificación (Cf).

Tabla 7.

Calificación del método de extracción de acuerdo al consumo de energía.

Método	Consumo de energía	Cf.
Extracción por hidrólisis acida	De acuerdo a Liew et al., la energía requerida por gramo de pectina es moderadamente alta debido a una condición de extracción prolongada a temperatura moderadamente alta en el método convencional.	3
Extracción asistida por ultrasonido	Tiene un bajo consumo de energía ya que los gradientes térmicos y de concentración son reducidos, al igual que temperatura de extracción, así mismo algunos pasos del proceso convencional son eliminados por lo tanto esto es reflejado en la demanda energética del método[68].	5
Extracción asistida por microondas	La extracción de pectina de residuos y subproductos agroindustriales asistida por microondas ha sido tema de estudio de varios grupos de investigación debido a que poseen ventajas frente a las tecnologías tradicionales pues el consumo requerido de energía es menor, al igual que la cantidad demandada de disolvente orgánico.[11]	5
Extracción asistida por enzimas	Tiene un bajo consumo de energía al trabajar a temperaturas bajas [69], sin embargo el proceso puede ser optimizado aún más dosificando la	5

	enzima y el tiempo de extracción pues se reduce el aporte energía con tiempo de reacción más cortos [70].	
Extracción por fluidos súper críticos	Liew et al. comparó el método de fluidos supercríticos frente a un método híbrido y el convencional, en este caso el método de fluido supercríticos tuvo el mayor consumo de energía debido a su temperatura de operación, adicionalmente se requiere bombeo aumentando aún más el consumo energético [47].	2
Extracción por alta presión	Según Mao et al, en este método influye el tiempo corto de alivio de presión que induce a una mayor fuerza de impacto, esto resulta en una mayor tasa de extracción, menor tiempo de extracción y un bajo consumo de energía. Si no se tiene en cuenta este factor el consumo puede llegar a ser moderado [19].	4
Extracción por método híbridos	El consumo depende de los métodos combinados empleados pues en algunos la demanda energética puede ser baja en comparación al método convencional sin embargo pueden aumentar de acuerdo a los métodos individuales.	4

Nota. La tabla contiene el consumo energético indicado como bajo, alto o moderado con la respectiva calificación dada por las autoras.

3.1.1.vi. Análisis de selección del método de extracción. De acuerdo a lo anterior, se realiza la tabla de ponderación consolidando la calificación dada para cada uno de los métodos según el criterio evaluado.

Tabla 8.

Consolidación de la calificación final para cada uno de los métodos.

Criterio	Pd	Hidrólisis ácida		Ultrasonido		Microondas		Enzimas		Supercríticos	
		Cf	Ev	Cf	Ev	Cf	Ev	Cf	Ev	Cf	Ev
Disponibilidad de equipos	0.3	5	1.5	3	0.9	4	1.2	5	1.5	2	0.6
Rendimiento obtenido	0.2	4	0.8	5	1	5	1	3	0.6	3	0.6
Costo de implementación del proceso	0.1	4	0.4	4	0.4	3	0.3	4	0.4	2	0.2

Revisión bibliográfica obtenida para el mucílago de café	0.3	5	1.5	1	0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3
Consumo de energía	0.1	3	0.3	5	0.5	5	0.5	5	0.5	2	0.2
Total	1		4.5		3.1		3.3		3.3		1.9

Continuación

Criterio	Pd	Alta presión		Métodos híbridos	
		Cf	Ev	Cf	Ev
Disponibilidad de equipos	0.3	3	0.9	1	0.3
Rendimiento obtenido	0.2	3	0.6	5	1
Costo de implementación del proceso	0.1	2	0.2	1	0.1
Revisión bibliográfica obtenida para el mucílago de café	0.3	1	0.3	1	0.3
Consumo de energía	0.1	4	0.4	4	0.4
Total	1		2.4		2.1

Nota. La tabla contiene la evaluación final de cada uno de los posibles métodos a utilizar.

Conforme a las ventajas y desventajas de los métodos de extracción de pectinas expuestos anteriormente, se observa que si bien todas cuentan con grandes ventajas, la extracción por hidrólisis ácida es la opción más adecuada obteniendo una evaluación final de 4.5, debido a que la mayoría de estudios realizados se generan en torno a esta por su fácil aplicación, su gran rendimiento para obtener el producto de calidad y resulta ser fácil de caracterizar la pectina de esta manera; además se encuentran las condiciones óptimas estudiadas por otros autores que respaldan el uso del mucílago como materia prima adecuada para extraer pectinas. En cuanto a las otras opciones para la extracción se descartan, principalmente por la imposibilidad de realizar estudios previos en busca de la optimización y mejora de estos métodos al utilizar el mucílago de café.

3.1.2. Caracterización del mucílago de café

Según la caracterización realizada por Jessica García, Héctor Mendoza y Moronta et al., el pH del mucílago oscila entre 4.7 y 5.75, los grados °Brix oscilan entre 2 y 6.6 y la temperatura se encuentra entre 12-14 °C [2], [20], [71], además ha sido estudiada la composición química del mucílago de café, en el cual el porcentaje de compuestos pépticos se encuentra entre 5,39% a 17,8% en base seca, y la cantidad de azúcares totales es aproximadamente 50% a 70,48%, lo que resta es conformado por cenizas, fibra, entre otros.[4], [72].

De conformidad con lo mencionado anteriormente, la muestra recolectada de La Finca la Argelia se caracteriza evaluando el pH, °Brix y temperatura con la que se cuenta al momento de llegar a laboratorio, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 9

Tabla 9.

Datos obtenidos en la preparación de la materia prima.

Muestra	pH	°Brix	Temperatura
Mucilago de Café	4.5	7.2	14°C

Nota. La tabla contiene los valores de pH, °Brix y temperatura inicial que se le realizaron a la muestra de mucilago de café.

Según estos resultados se obtiene un mayor °Brix pues se tienen 7.2 g de sacarosa por cada 100 g de solución, esto indica que la materia prima presenta un cambio en la composición con respecto a lo reportado por otros autores, quienes obtuvieron 2 °Brix, por el contrario, para el pH y la temperatura los valores se encuentran cercanos a los rangos establecidos.

En el Anexo 2 son mostrados los equipos que se utilizaron para obtener los datos de la preparación de la materia prima.

3.1.2.i. Pruebas microbiológicas. Con el objetivo de caracterizar el mucílago como posible materia prima para la extracción de pectinas y elaboración de películas se realizaron las pruebas de recuento de mesófilos aerobios, enterobacterias, coliformes totales y mohos y levaduras. Los resultados son mostrados a continuación:

Figura 7.
Resultados de pruebas microbiológicas de la materia prima.

4. RESULTADO				
MUESTRA 036-1: Mucílago de café (Muestra tomada en Armenia - Quindío)				
Ensayo	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones
Recuento Total de Mesófilos Aerobios	NTC 4519	$2,3 \times 10^6$	UFC/mL	-----
Recuento de Enterobacterias	NTC 5733	< 10	UFC/mL	-----
Recuento de Coliformes Totales	ISO 4832	< 10	UFC/mL	-----
Recuento de Mohos y Levaduras	NTC 5698-1	$1,0 \times 10^4$ Mohos, $4,4 \times 10^3$ Levaduras	UFC/mL	-----
Observaciones: N/A				
*Referencias documentales				
SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edition. 2017				
AOAC: Official Methods of Analysis of AOAC International. 20th Edition. 2016				
USP: United States Pharmacopeia.				
INVIMA: Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos				
ICMSF: International Commission on Microbiological Specifications for Foods				
NTC: Norma Técnica Colombiana. ICONTEC				

Nota. La figura muestra los resultados de las pruebas microbiológicas obtenidas del mucílago de café.

Según los resultados, para el recuento de mesófilos aerobios [73], se evidencia una gran carga microbiana, esto puede ser debido a dos factores, el primero puede estar dado por el tiempo prolongado que se almacenó la materia prima e influyó en la vida útil de esta y el segundo en la afectación de las buenas prácticas de manufactura al momento de tomar la muestra; sin embargo, tener una carga elevada de este recuento no significa que exista una presencia de microorganismos patógenos. Por otro lado, en el recuento de enterobacterias y coliformes totales [74] se refleja una carga baja de estas, lo que significa que la materia prima no tuvo un tratamiento inadecuado en cuanto a las condiciones sanitarias del medio en el que fue elaborado. Finalmente, en el recuento de hongos y levaduras se presentó una alta carga ya que la materia prima es de carácter ácido, lo que indica que hongos y levaduras crecerán de manera más rápida respecto a las bacterias, a su vez, estos tienen la capacidad de producir microtoxinas que pueden ser un peligro potencial para la salud, es por esto que es necesario mantener la materia prima con las características propias durante su tratamiento, almacenamiento y transporte. Este análisis fue realizado a partir de las normas mencionadas en el apartado 2.1 para cada microorganismo indicador.

3.1.3. Extracción de pectina por método seleccionado

Al finalizar el proceso de extracción de pectina del mucilago de café, se pesó la pectina obtenida. Teniendo en cuenta que se empleó un litro de mucilago para esta prueba, el rendimiento obtenido de pectina fue de 21,83%, este cálculo es mostrado en el Anexo 3 y la Figura 8 muestra cada una de las etapas a las que se sometió la materia prima para la obtención de pectina.

Figura 8.

Etapas de extracción de pectina por hidrólisis acida.

A) Acondicionamiento de la materia prima



B) Hidrólisis



C) Filtración con bomba de vacío



D) Precipitación



E) Purificación



F) Obtención de pectina



Nota. En la figura se observa la extracción realizada a nivel laboratorio por medio de las siguientes etapas: **A) Acondicionamiento de la materia prima B) hidrólisis:** la materia prima se ajusta a un pH de 3 con ácido sulfúrico, luego de 45 minutos a una temperatura de 70°C, el pH es ajustado con hidróxido de sodio a 5.5. **C) Filtración:** se muestra el montaje de bomba de vacío utilizado para retirar sólidos gruesos y finos. **D) Precipitación:** Se observa el coágulo obtenido después de agregar alcohol al 95%. **E) Purificación:** se realiza un lavado con alcohol al 95% para retirar impurezas. **F) Obtención de pectina:** la pectina es separada y secada sin que quede totalmente seca.

3.1.4. Caracterización de pectina

El producto obtenido del proceso anterior, debe ser caracterizado para clasificar la pectina en cada una de sus propiedades, de igual manera representan variables de respuesta que permiten determinar el uso de la pectina a nivel industrial.

3.1.4.i. Determinación de solubilidad. De acuerdo a la metodología la pectina mucílago demostró solubilidad positiva al agua, por lo tanto, contiene un gran número de grupos carboxílicos esterificados, evidenciados en la inspección visual de la solución, la cual es opalescente, y tiene una naturaleza viscosa como se muestra en la figura 9.

Figura 9.

Prueba de solubilidad.



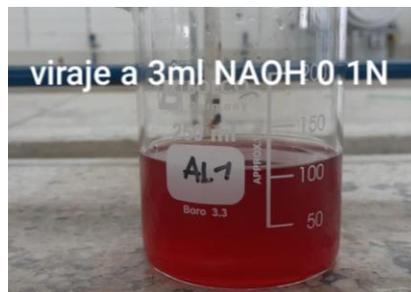
Nota. La figura representa la solubilidad positiva en agua de la pectina de mucílago de café.

Dados los resultados, se observa que la pectina tiene el mismo comportamiento respecto a Jessica García, quien clasifica su pectina como soluble en agua e insoluble en alcohol [20].

3.1.4.ii. Determinación del peso equivalente y acidez libre. Al realizar el ensayo de titulación para determinar peso equivalente y acidez libre fue necesario un volumen de 3ml de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1N para evidenciar el cambio en la tonalidad de la solución.

Figura 10.

Titulación para la determinación de peso equivalente y acidez libre.



Nota. La figura representa el viraje obtenido de la titulación realizada para determinar peso equivalente y acidez libre.

De acuerdo a lo anterior, el peso equivalente indica el comportamiento que tiene la pectina, basado en el grado de ácido -D galacturónico que la muestra alcance en la hidrólisis, obteniendo 1693.33 mg/meq, comparando con Mariana Valdespino et al [30] la pectina extraída tiene un alto peso equivalente ya que en este estudio se obtuvo un valor de 1476 g/eq, mientras que en comparación con Luisa Márquez et al [33] el peso equivalente es menor debido a que estas autoras lograron un valor de 3666.67 mg/meq. Por tal razón, según Mónica Apolo [75] si la pectina contiene un peso equivalente alto, la cadena de ácido tuvo una menor fragmentación durante la hidrólisis, en caso contrario las que obtienen un peso equivalente bajo tienen una mayor fragmentación de la cadena, adicionalmente, otro factor como el tiempo de extracción deben tenerse en cuenta, ya que, si la extracción tiene un buen tiempo de proceso se obtiene una mayor cantidad de producto de interés, lo que quiere decir que lo esperado es tener un menor peso equivalente de esta. En este caso, la pectina producida presentó una alta fragmentación en su cadena. Sin embargo, el proceso puede ser optimizado, aumentando el tiempo de extracción para así reducir el peso equivalente y alcanzar una mayor cantidad de producto de interés.

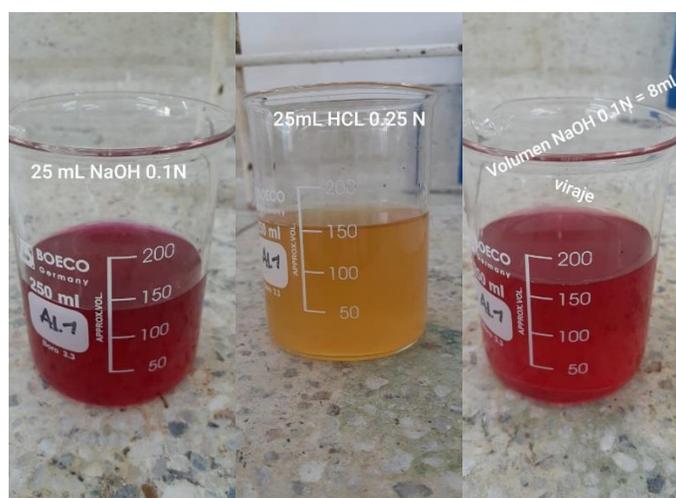
Por otro lado, la acidez libre refleja la cantidad de ácido D-galacturónico en la pectina después de realizada la extracción, esta acidez libre va aumentando a medida que el pH es más bajo. Según lo reportado para pectina de mucílago de café el rango de acidez libre se encuentra entre 0.33-0.72 meq/g [30], [33], siendo el pH y la interacción del tiempo factores claves al momento de realizar los respectivos análisis, ya que, si se tiene un pH bajo y tiempo en aumento, la acidez libre disminuye, mientras que, si el pH es mayor y el tiempo aumenta, la acidez libre aumenta haciendo que los monómeros formadores de la pectina se liberen [33]. Finalmente, el ensayo de acidez libre reportó un valor 0.59 meq/g indicando que se encuentra en el rango establecido, demostrando así que el pH de la hidrólisis no causó una gran desesterificación de los grupos carboxilos.

Los cálculos realizados para este numeral se evidencian en el Anexo 3.

3.1.4.iii. Determinación del porcentaje de metoxilo. Las pectinas se pueden clasificar en pectinas de alto metoxilo y bajo metoxilo, este porcentaje representa los restos de ácido galacturónico esterificado con metanol, para un porcentaje mayor a 50% de esterificación con metanol (7% de metoxilo) la pectina es catalogada como de alto metoxilo y para el caso contrario se dice que la pectina es de bajo metoxilo [12], [76]. A continuación, en la figura 11 se muestra la solución inicial para la determinación de metoxilo y la solución titulada.

Figura 11.

Prueba de porcentaje de metoxilo.



Nota. La figura muestra la preparación de la solución y el resultado obtenido para la prueba de porcentaje de metoxilo.

Acorde con los autores consultados el porcentaje de metoxilo de la pectina de mucilago de café es bajo con un valor entre 6.03% a 6.21% en el que se clasifica la pectina de mucilago de café como bajo metoxilo [20], [30], [33]. Sin embargo, al realizar la titulación y los cálculos respectivos mostrado en el Anexo 3, se obtuvo un valor de 4.88%, por lo tanto la pectina es de bajo metoxilo como se esperaba, no obstante el valor al estar por debajo de lo reportado, indica que la pectina podría tener dificultad para gelificarse [76].

3.1.4.iv. Determinación del grado de esterificación. Como se mencionó en el numeral anterior, las pectinas se pueden clasificar en alta y baja metilación de acuerdo al análisis de acidez libre y grado de metoxilo; un grado de esterificación mayor a 50% es clasificado como alto, y por debajo de este, se clasifica como bajo. En comparación con Luisa Márquez et al. [33], quien obtuvo un grado de esterificación de 93.30% y con Mariana Valdespino et al [30], quien alcanzó un grado de esterificación de 84.2%, el valor obtenido de 72.72%, tras realizar la resolución de la ecuación mostrada en el Anexo 3, evidencia una alta metilación en la pectina y poca desviación con respecto a las autoras mencionadas. No obstante, existe una incongruencia con el dato reportado del grado de metoxilo, dado que estos están directamente ligados, en consecuencia la relación entre el contenido de Metoxilo y grado de esterificación demuestra la presencia de otros grupos, que forman complejos con los grupos carboxilos del ácido poligalacturónico, ya que la esterificación del grupo carboxilo de la pectina no se realiza mediante grupo metoxilo, si no con etoxilo o grupos ácido que forman compuestos como los de tipo amida, como lo asegura Esteban Cabarcas [12].

Adicionalmente, se tiene en cuenta que el grado de esterificación es un factor que incide directamente en la habilidad de formación de biopelículas que tiene la pectina [21], [77] y por lo tanto se tendrá en cuenta en el análisis de la película producida.

3.2. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de películas de la biopelícula obtenida a diferentes concentraciones de pectina de mucílago de café

Con el paso del tiempo, la innovación en materiales ha estado cada vez más presente, pues se sabe que los materiales hechos de recursos no renovables generalmente ocasionan problemas ambientales, por tanto, los biomateriales presentan una alternativa prometedora debido a que usualmente no son tóxicos, son renovables y son aplicables en la formulación de películas. Según Daybelis Fernández los biomateriales más utilizados en la formulación de películas son los polisacáridos, en los que se encuentran las pectinas de alto y bajo metoxilo, la celulosa y sus derivados, el alginato, el quitosano, la dextrina, el carragenato, y la goma arábiga [78], sin embargo en busca de aprovechar las ventajas de todos los biomateriales, en las formulaciones se introducen proteínas, lípidos, resinas, emulsificantes y plastificantes en diferentes proporciones [79].

Normalmente, el plastificante se requiere en la elaboración de las biopelículas debido a que modifican las propiedades mecánicas, reduciendo su fragilidad y rigidez. La modificación es lograda por la entrada del plastificante a las cadenas poliméricas en donde se asocian fisicoquímicamente con el polímero, reduciendo la cohesión en la red de la biopelícula [21]. De igual forma, la concentración de pectina juega un papel importante en la elaboración de estas ya que la interacción entre pectina y plastificante genera diferentes alteraciones en la microestructura de las cadenas de pectina [80].

En los últimos años, diferentes autores han estudiado el efecto de la concentración de pectina, la concentración de plastificantes y la concentración de otros elementos utilizados en la formulación de biopelículas con el objetivo de reemplazar los plásticos convencionales. Por tal motivo, David López et al. enfocaron su estudio en las propiedades que deben contener los revestimientos en la producción mediante el uso de un diseño experimental multifactorial 2^3 , usando como factores la concentración de pectina con niveles 4 y 6 % p/v, aceite mineral con 2 y 6 % p/v y glicerol con 3 y 6% p/v, en base a lo anterior las variables de respuesta fueron el porcentaje de elongación y resistencia a la tracción. El diseño de experimentos fue evaluado mediante un análisis de varianza ANOVA al 95% de confiabilidad, dando como resultado el efecto de la concentración de glicerol es positivo para el porcentaje de elongación ya que brinda mayor movilidad a la moléculas de pectina, en cambio la concentración de pectina influye negativamente en esta variable, en cuanto a la variable de resistencia a la tracción se muestra que los factores actúan de manera inversa, es decir, la concentración de pectina favorece esta propiedad mientras que la concentración del glicerol la disminuye [36].

Ahora bien, según Sánchez Aldana et al enfatiza la caracterización de la biopelícula en cuanto a las variables de permeabilidad al vapor de agua, espesor y fuerza a la tensión. El diseño de experimentos planteado fue un diseño experimental compuesto con tres variables: concentración de pectina, glicerol y aceite esencial de limón dando un total de 20 formulaciones para cada extracto. Como resultado se obtuvo una película con baja permeabilidad al vapor de agua $5.17 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$, espesor reducido de $130 \mu\text{m}$ y fuerza a la tensión de $1.48 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. De este estudio se destaca que las altas concentraciones de pectina y las bajas concentraciones de glicerol son los parámetros más adecuados para obtener las mejores propiedades, cabe resaltar que la materia

prima utilizada es de carácter ácido lo que permite extraer de manera más práctica y fácil la pectina requerida [22].

Cabe señalar que de acuerdo con Evelin Alata et al., a una mayor concentración de pectina aumenta la permeabilidad al vapor lo que influye negativamente en las biopelículas pues son recubrimientos que pueden ser usados en alimentos o en productos farmacéuticos que son afectados por estas condiciones. En su estudio se indica la concentración ideal de pectina la cual alcanza 40% p/p de la biopelícula, obteniendo su máxima elasticidad y llegando a los límites máximos de resistencia a la tensión y permeabilidad al vapor de agua [80].

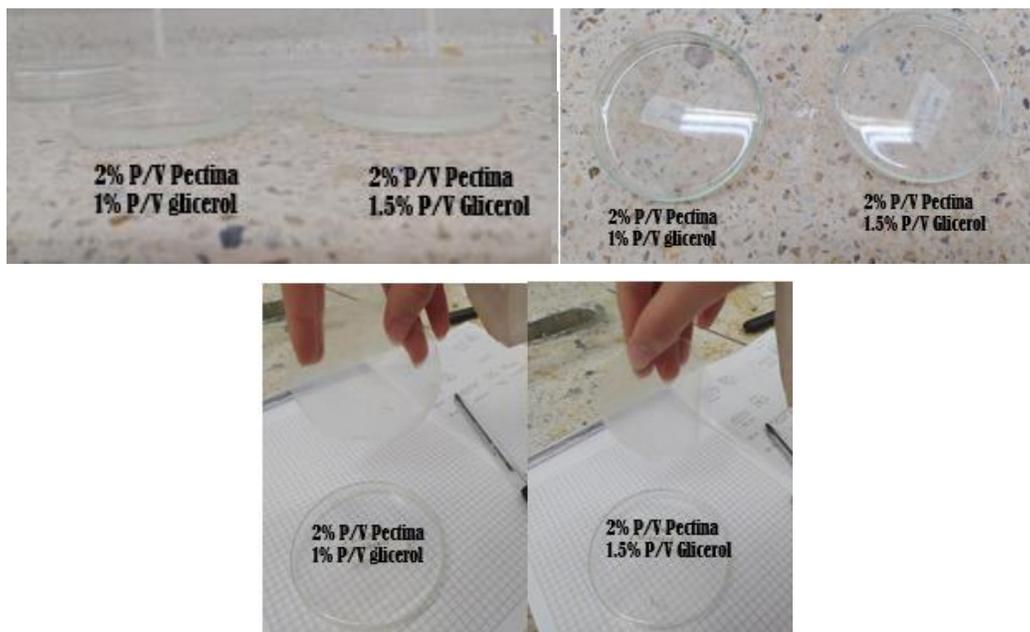
Por otro lado, Thi Minh Phuong et al. agrega quitosano a películas a base de pectina, para el cual la mejor relación fue del 50:50, encontrando en el quitosano propiedades antimicrobianas de acuerdo a que inhibe el crecimiento de *Colletotrichum gloeosporioides*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus niger* y *Escherichia coli* [81]. De igual forma, Heba G.R. Youni utilizan el quitosano y la pectina de alto metoxilo extraída de manzana para investigar los efectos sinérgicos entre ellos, evidenciando mayor transparencia y aumento de propiedades mecánicas gracias a las interacciones electroestáticas intermoleculares que existen entre los dos biomateriales[37].

Al igual que el quitosano, el almidón es agregado a películas a base pectina, Jutarat Prachayawarakorn et al estudió la adición de almidón dialdehído con el fin de mejorar la alta hidrofilia y las bajas propiedades mecánicas de las películas biodegradables de pectina de alto metoxilo[82], por otra parte Rosida et al. estudia concentraciones diferentes de almidón de yuca y glicerol en películas de pectina de piel de papaya, encontrando el mejor tratamiento fue la adición de almidón de yuca al 25% y la adición de glicerol al 10%[83].

Previamente a la elaboración de películas a partir de pectina extraída de mucilago de café, se realizaron pruebas previas con pectina cítrica en principio se tuvo en cuenta las concentraciones de pectina de 2% p/v, 4% p/v y 6% p/v, sin embargo para la última concentración se evidenció una difícil dilución en agua destilada a 80°C, por tanto se descartó esta concentración, los resultados obtenidos son mostrados en la figura 12 y 13 utilizando aceite mineral, tween 80 y el plastificante (glicerol).

Figura 12.

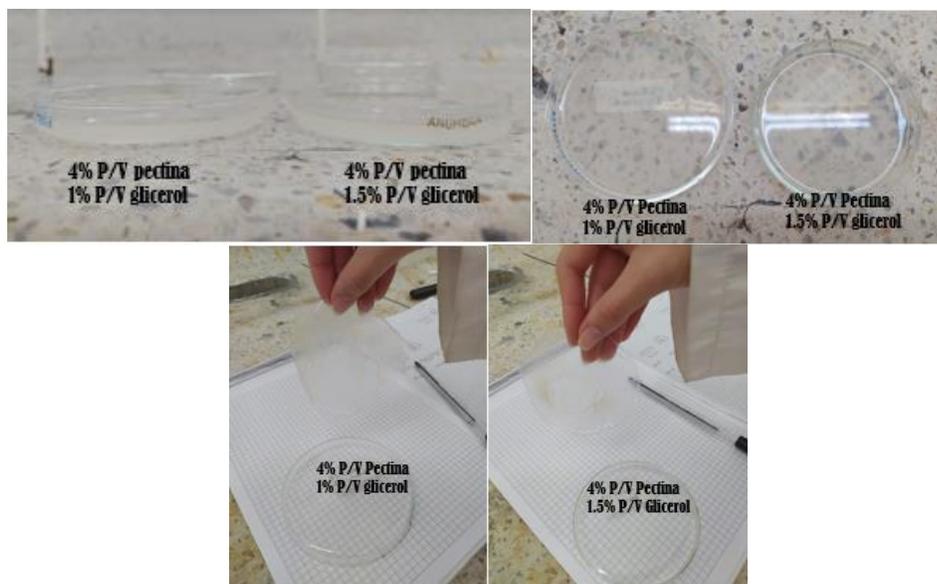
Elaboración de películas a partir de pectina cítrica al 2% p/v.



Nota. Pruebas previas para la elaboración de películas al 2%p/v.

Figura 13.

Elaboración de películas a partir de pectina cítrica al 4% p/v.



Nota. Pruebas previas para la elaboración de películas al 4%p/v.

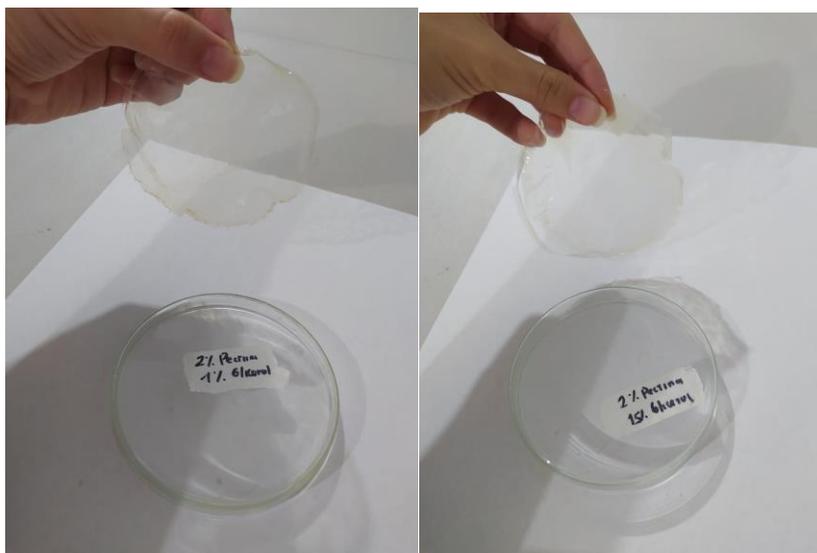
Según lo observado en las figuras 12 y 13 las películas obtenidas presentan una baja dilución del aceite mineral y el tween 80, por consiguiente, la uniformidad de la película se ve afectada, mostrando pequeñas dispersiones en el centro de la película. Este

fenómeno es reflejado aún más en las películas de concentración de pectina cítrica 4%p/v, debido a esto se realizan nuevas pruebas sin la adición del aceite mineral y el tween 80.

Los resultados obtenidos de las pruebas sin aceite mineral y sin el emulsificante (tween 80) fueron satisfactorios pues no presentan dispersión, además la uniformidad y la resistencia es observada en las películas, en las figuras 14 y 15 se pueden evidenciar el producto de este ensayo, en el cual no se cambian las concentraciones estudiadas de pectina y glicerol.

Figura 14.

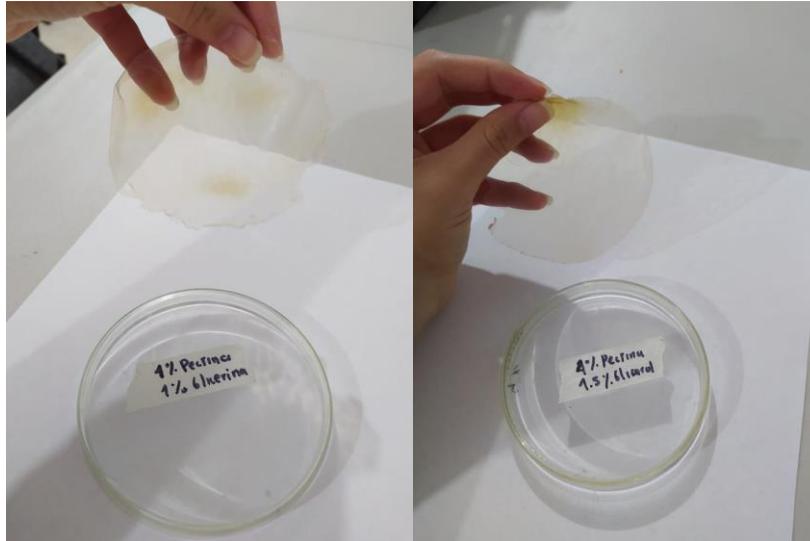
Elaboración de películas de pectina cítrica al 2% sin Aceite mineral y Tween 80.



Nota. Pruebas de formación de película al 2% de pectina sin aceite mineral y tween 80.

Figura 15.

Elaboración de películas de pectina cítrica al 4% sin Aceite mineral y Tween 80.



Nota. Pruebas de formación de película al 4% de pectina sin aceite mineral y tween 80.

Según lo observado anteriormente, se comprueba la formación de la matriz polimérica a partir de pectina, por consiguiente, no fue necesario adicionar otros biomateriales como algunos autores mencionados, quienes utilizan quitosano o almidón para reforzar las películas. Adicionalmente, los resultados de la prueba cualitativa de las películas indican que la concentración de pectina de 4%p/v a una concentración de glicerol 1%p/v logran un espesor y una resistencia mayor.

Considerando la prueba cualitativa realizada para las pruebas previas, se elaboran las películas de pectina extraída de mucílago a la concentración de 4% p/v con una concentración de glicerol 1% p/v.

Figura 16.

Películas obtenidas de pectina de mucílago de café.



Nota. La figura muestra las películas obtenidas de mucílago de café al 4%p/v y glicerol a 1%p/v.

Tras realizar la prueba con la concentración descrita anteriormente, se observa en la figura 16 que la propiedad de formación de película de la pectina de mucílago presenta una estructura débil, por lo que se quiebra fácilmente y no permite la remoción de esta. Esto es causado por que la pectina utilizada presenta un grado de esterificación alto pero un porcentaje de metoxilo bajo, en consecuencia la habilidad de formación de película se ve afectada pues el grado de esterificación está indicando que hay formación de grupos ácidos en forma de éster debido a la presencia de otros grupos funcionales por lo que impide la creación de matriz polimérica [84].

Posteriormente, al combinarse la pectina cítrica y de mucílago se evidenció la formación de película, con una estructura compacta para la fácil remoción de la caja de Petri como se muestra en la figura 17.

Figura 17.

Películas obtenidas de la combinación de pectina cítrica y de mucílago de café.



Nota. La figura muestra una película compacta de pectina cítrica y de mucílago de café

Finalmente, con las películas obtenidas se procedió a evaluar sus propiedades en el numeral 3.2.1, teniendo en cuenta que las películas de mucílago de café no son aptas para las pruebas, por lo cual no se tuvieron resultados cuantitativos.

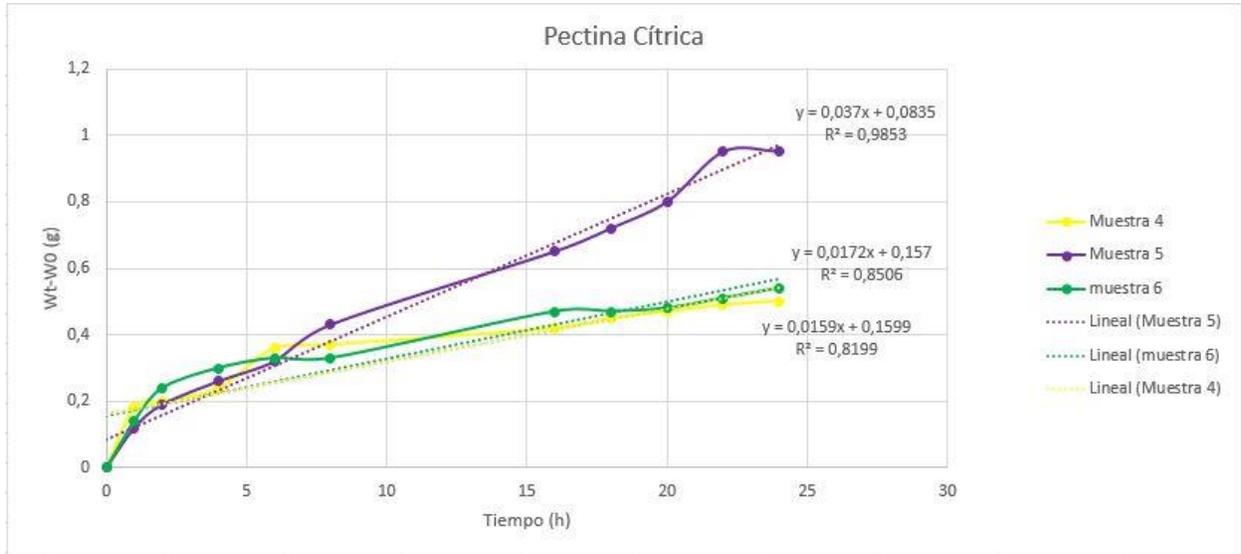
3.2.1. Caracterización de películas de pectina

3.2.1.i. Prueba de permeabilidad al vapor de agua. Esta propiedad es importante debido a que el recubrimiento o película tiene como función evitar y reducir la humedad transferida entre la atmosfera y el producto, es por esto que el valor debe ser el más bajo posible[85]. Sin embargo, para llegar al valor adecuado se deben tener en cuenta factores que influyen la capacidad de permeabilidad como: la estructura del polímero, la proporción de zonas cristalinas y amorfas, la proporción hidrófilo-hidrófobo y la interacción entre las principales cadenas poliméricas y la presencia de plastificantes u otros aditivos[86], para el caso del glicerol entre mayor sea la cantidad agregada, mayor será el valor de la permeabilidad al vapor de agua, ya que disminuye las fuerzas intermoleculares en las cadenas del polímero, dando una mayor movilidad molecular, a su vez se incrementan el volumen libre, y por lo tanto existirá más espacio para que las moléculas de agua migren [87]. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas de $W_t - W_0$ vs tiempo de la película cítrica y la película compuesta.

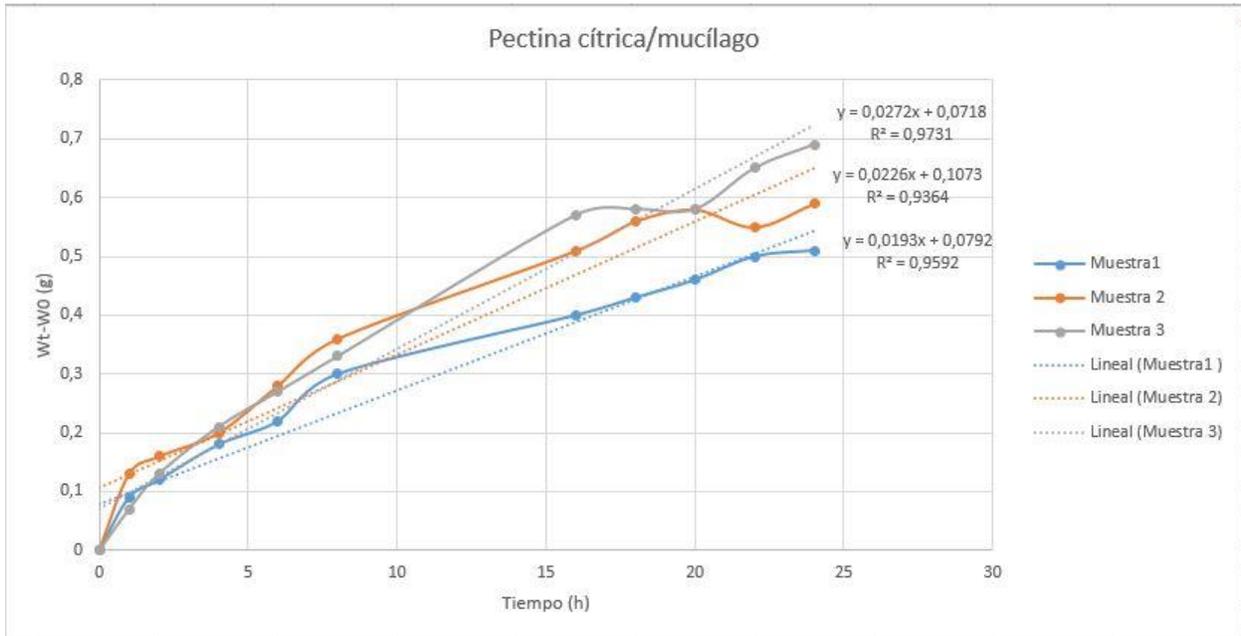
Figura 18.

Gráficas $Wt-W_0$ vs tiempo.

A)



B)



Nota. Se muestra las gráficas w_t-w_0 vs tiempo obtenidas de la prueba de permeabilidad al vapor de agua. **A)** Datos obtenidos para las películas de pectina cítrica. **B)** Datos obtenidos para las películas compuestas (cítrica y mucílago de café).

Según las gráficas presentadas se obtiene las pendientes para cuantificar el WVT y luego el promedio de la permeabilidad respectiva, estos cálculos son mostrados en el

Anexo 3, en donde la permeabilidad promedio para la película de pectina cítrica es de $2.97 \cdot 10^{-11}$ g/ Pa*s*m y para la película de pectina compuesta es de $2.93 \cdot 10^{-11}$ g/Pa*s*m. Estos valores están indicando que la película de pectina compuesta presenta una menor permeabilidad, lo cual se logra al tener en su formulación pectina de mucílago de café la cual le aporta esta propiedad de barrera.

Por otro lado, los valores reportados para película de pectina de mucílago de café se encuentran entre 3.03 y $3.08 \cdot 10^{-12}$ g/Pa*s*m según Mariana Valdespino [30], sin embargo se encuentran valores más bajos para películas hechas de pectina como pectina de flor de Jamaica la cual se obtienen valores de 4 a $14.5 \cdot 10^{-12}$ g/Pa*s*m [88], y en comparación al polietileno de baja y alta densidad con valores de $1.5 \cdot 10^{-13}$ y $4 \cdot 10^{-14}$ g/Pa*s*m respectivamente [89], se tiene que la película compuesta presenta valores altos que pueden afectar su posible aplicación como recubrimiento.

3.2.1.ii. Prueba de fuerza a la tensión. Inicialmente, para obtener un valor adecuado es necesario que la biopelícula mantenga un grosor similar en todos los tratamientos debido a que a mayor grosor, mayor fuerza es requerida para fracturar la película [90]; así mismo la adición del plastificante le otorgará menor rigidez molecular, influyendo positivamente en esta propiedad, aportando flexibilidad y extensibilidad [88], [90]. Sin embargo, la prueba no fue realizada por problemas de orden público en el mes de mayo, los cuales impidieron el acceso al laboratorio de materiales ubicado en la Universidad San Buenaventura-sede Cali.

3.3. Descripción de especificaciones técnicas y condiciones de proceso a nivel planta piloto

El diseño general del proceso surge como un escalamiento de los equipos empleados en el laboratorio de ciencias aplicadas de la Universidad Santiago de Cali y de las revisiones realizadas en las bases de datos Scopus, Researchgate y Scielo sobre el procesamiento y diseño de plantas de extracción de pectina y sobre el procesamiento y elaboración de biopelículas a nivel industrial. Se escoge como parámetro que la Finca la Argelia es el lugar en donde se realizará el escalamiento de la planta piloto.

Con el fin de seleccionar los equipos más adecuados para el proceso, se toman en cuenta diferentes criterios dependiendo del equipo requerido, por tal razón, para los tanques, el tipo de operación es definido entre almacenamiento, mezcla, reacción o

transporte, a su vez, la forma geométrica y accesorios como el tipo de calentamiento/enfriamiento y tipo de agitador; en cuanto al filtro, se considera la cantidad a filtrar y la cantidad de sólidos para seleccionar el equipo. Finalmente, para el secador se tuvo en cuenta la clasificación de estos entre lotes o continuos, la humedad requerida del producto final y tasa de producción.

Una vez establecido esto, se determina mediante la tabla 10 el paso a paso del proceso que se realizará para la extracción de pectina y elaboración de biopelícula a escala industrial.

Tabla 10.

Proceso realizado para la extracción de pectina y elaboración de biopelícula a escala industrial.

Etapa	Equipo	Nivel Industrial
Acondicionamiento de mucílago	Filtro prensa	El mucílago de café fue filtrado para extraer sólidos gruesos que trae del proceso de desmucilaginado que se consideran impurezas.
Hidrólisis ácida	Tanque abierto enchaquetado	Se coloca la materia prima en un tornillo de Arquímedes para transportarla hasta el tanque abierto enchaquetado[12], una vez ingresada, se realiza un calentamiento con el fin de acondicionar la materia prima hasta una temperatura deseada de 70 °C. Posteriormente, se agregan la cantidad necesaria de H ₂ SO ₄ para obtener un pH de 3 y dejar a esta temperatura 45 min. Una vez finalizado el tiempo de extracción, se ajusta el pH a 5,5 con la cantidad necesaria de NaOH 1M.
Filtración I	Filtro prensa	Una vez hidrolizada la materia prima, se lleva a un filtro prensa[91] con ayuda de una bomba, con el fin de retirar las impurezas obtenidas que puedan afectar la calidad de la pectina.
Precipitación	Tanque cerrado enchaquetado	El filtrado es llevado por tubería hasta el tanque cerrado enchaquetado[91], al cual se lleva hasta una temperatura de 35 °C aproximadamente para agregar alcohol industrial al 95% y dejarlo precipitar durante un tiempo.

Filtración II	Filtro prensa	Para esta filtración, el precipitado es llevado al filtro prensa ubicado en la filtración I por medio de una bomba, esto, con el fin de disminuir costos en la implementación de estos.
Reprecipitación	Tanque cerrado enchaquetado	Posteriormente, el producto obtenido de la filtración II, se divide en dos corrientes, una de estas se dirige al secador y la segunda corriente es dirigida al tanque de precipitación con el fin de realizar otro lavado.
Secado	Secador de bandejas	La pectina obtenida es llevada a un secador de bandejas[91], en el cual se realiza el proceso hasta llegar a una humedad del 35%.
Mezclado	Tanque mezclador enchaquetado	En este se realiza la solución formadora de película en el cual la pectina es diluida en agua a 80°C, por ende se hace necesario el calentamiento, luego es agregada la concentración requerida de glicerol[92] proveniente de una reservorio en el cual está diluido.
Casting continuo	Líneas de revestimiento de bandas	La solución obtenida del mezclado se esparce uniformemente sobre una banda transportadora la cual pasa a través de una cámara de secado para eliminar el agua y aún adherida se envuelve en rollos. [92], [93] Finalmente, la biopelícula obtenida es sometida a pruebas de calidad.

Nota. La tabla recopila el proceso a escala industrial de la extracción de pectinas y de elaboración de películas.

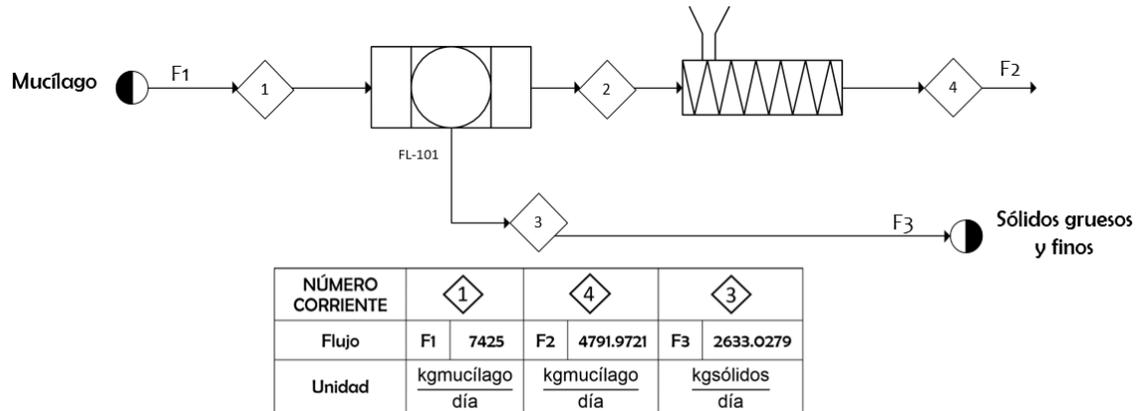
Para establecer las especificaciones de los equipos, es necesario realizar un balance de masa teniendo en cuenta la base de cálculo planteada inicialmente es de 7425 kg mucílago/día.

3.3.1. Balance de masa

3.3.1.i. Acondicionamiento.

Figura 19.

Balance de masa para el proceso de acondicionamiento.



Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente en la que participa el acondicionamiento de la materia prima.

La densidad se asume como 0.9845 kg/l de acuerdo a revisión bibliográfica [20].

$$7425 \frac{\text{Kg mucilago}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ l}}{0.9845 \text{ kg}} = 7541.90 \text{ l mucilago}$$

En laboratorio se obtuvo 349.12g de solidos por litro de mucílago de café

$$7541.90 \text{ l} * \frac{349.12\text{g}}{1 \text{ l}} * \frac{1\text{kg}}{1000 \text{ g}} = 2633.03 \text{ kg}$$

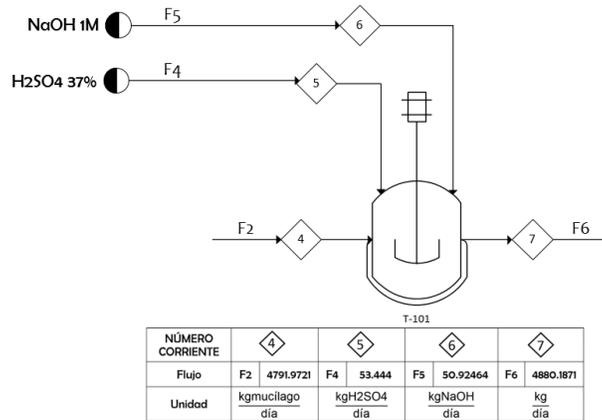
$$7425 \frac{\text{kg mucilago}}{\text{día}} - 2633.03 \frac{\text{Kg solidos}}{\text{día}} = 4791.97 \frac{\text{kg mucilago}}{\text{día}}$$

El flujo de entrada al reactor de hidrólisis es 4791.97 kg/día.

3.3.1.ii. Hidrólisis.

Figura 20.

Balace de masa para el proceso de hidrólisis ácida.



Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente en la que participa el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio en el proceso de hidrólisis ácida.

El flujo másico de entrada por densidad se expresa en flujo volumétrico

$$4791.97 \frac{\text{Kg mucilago}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ l}}{0.9845 \text{ kg}} = 4867.41 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

Se utilizaron 3ml de ácido sulfúrico H2SO4 por cada 500 ml de mucilago en laboratorio y la densidad de ácido sulfúrico al 37% fue estimada en 1.277 kg/l

$$4867.41 \frac{\text{l}}{\text{día}} * \frac{3 \text{ ml H2SO4}}{500 \text{ ml}} = 29.20 \text{ l H2SO4/día}$$

$$29.20 \frac{\text{l H2SO4}}{\text{día}} * \frac{1.277 \text{ kg}}{1 \text{ l}} = 37.29 \text{ kg H2SO4/día}$$

Luego de un tiempo estimado de 45 minutos se agrega 5ml de hidróxido de sodio NaOH por cada 500ml. La densidad del hidróxido de sodio al 1M es de 1.04 kg/l

$$4867.41 \frac{\text{l mucilago}}{\text{día}} + 29.20 \frac{\text{l H2SO4}}{\text{día}} = 4896.61 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

$$4896.61 \frac{\text{l}}{\text{día}} * \frac{5 \text{ ml NaOH}}{500 \text{ ml solución}} = 48.97 \frac{\text{l NaOH}}{\text{día}}$$

$$48.97 \frac{\text{l NaOH}}{\text{día}} * \frac{1.04 \text{ kg}}{1 \text{ l}} = 50.93 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{día}}$$

El flujo másico y volumétrico de salida será la suma de hidróxido de sodio y la solución de ácido sulfúrico y el mucílago

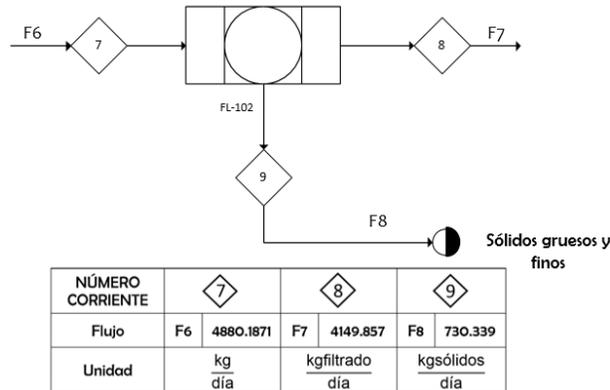
$$4791.97 \frac{\text{Kg mucílago}}{\text{día}} + 37.29 \frac{\text{kg H2SO4}}{\text{día}} + 50.93 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{día}} = 4880.19 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$4867.41 \frac{\text{l mucílago}}{\text{día}} + 29.20 \frac{\text{l H2SO4}}{\text{día}} + 48.97 \frac{\text{l NaOH}}{\text{día}} = 4945.58 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

3.3.1.iii. Filtración 1.

Figura 21.

Balace de masa para el proceso de filtración.



Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente que ingresa y salen del filtro.

En el laboratorio por cada 2 litros se obtuvo 1.7 litros de filtrado

$$4945.58 \frac{\text{l}}{\text{día}} * \frac{1.7 \text{ l}}{2 \text{ l}} = 4203.74 \frac{\text{l filtrado}}{\text{día}}$$

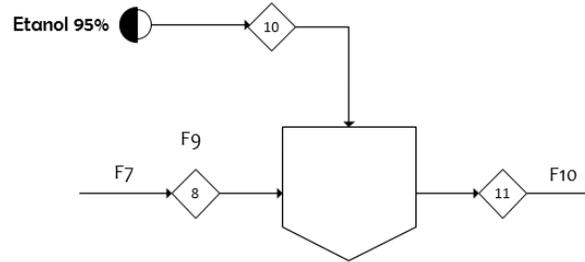
$$4945.58 \frac{\text{l entrada}}{\text{día}} - 4203.74 \frac{\text{l filtrado}}{\text{día}} = 741.84 \frac{\text{l}}{\text{día}} * \frac{0.9845 \text{ kg}}{1 \text{ l}} = 730.34 \frac{\text{Kg solidos}}{\text{día}}$$

$$4880.19 \frac{\text{kg}}{\text{día}} - 730.34 \frac{\text{kg solidos}}{\text{día}} = 4149.85 \frac{\text{kg filtrado}}{\text{día}}$$

3.3.1.iv. Precipitación.

Figura 22.

Balace de masa para el proceso de precipitación.



NÚMERO CORRIENTE	8	9	10	11		
Flujo	F7	4149.857	F9	3375.607	F10	7525.465
Unidad	kgfiltrado		kgetanol		kg	
	día		día		día	

Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente de entrada y salida en la que participa el etanol.

El etanol al 95% es agregado en una relación 1:1 volumétrica por lo tanto a los 4203.74 litros de filtrado es adicionada la misma cantidad de etanol

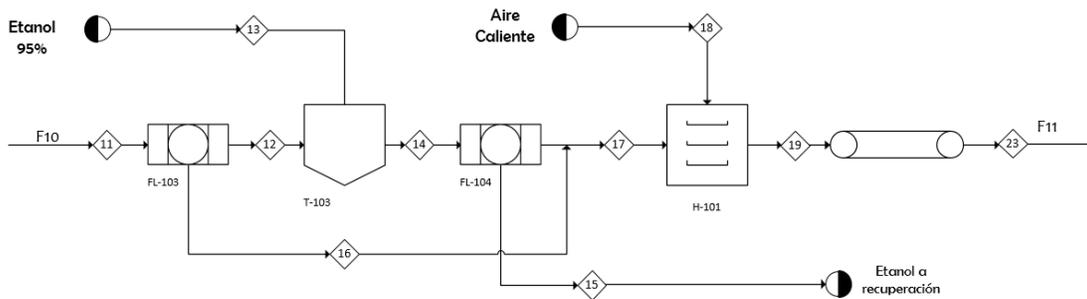
$$4203.74 \frac{l \text{ etanol}}{día} * \frac{0.803 \text{ kg}}{1 l} = 3375.60 \frac{kg \text{ etanol}}{día}$$

$$4149.85 \frac{kg \text{ filtrado}}{día} + 3375.60 \frac{kg \text{ etanol}}{día} = 7525.45 \frac{kg}{día}$$

3.3.1.v. Secado.

Figura 23.

Balace de masa para el proceso de secado.



NÚMERO CORRIENTE	11	23		
Flujo	F10	7525.465	F11	164.639
Unidad	kg		kg	
	día		pectina húmeda	
			día	

Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente de entrada y salida en el proceso de secado.

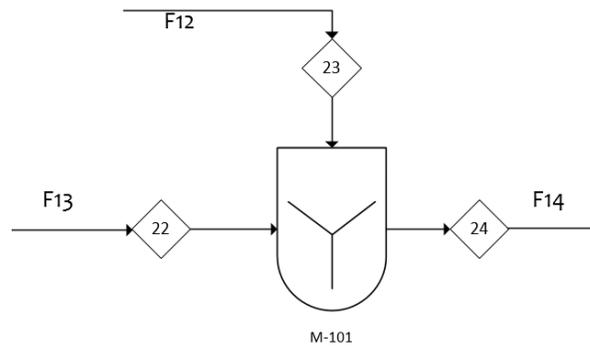
Cuando se tiene una humedad aproximada del 35% se pesa la pectina obtenida luego de la filtración 2 y reprecipitación. El rendimiento fue de 21.83% pectina seca por litro de mucilago inicial.

$$7541.90 \frac{l \text{ mucilago}}{\text{día}} * \frac{21.83 \text{ g pectina}}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 164.64 \frac{\text{kg pectina}}{\text{día}}$$

3.3.1.vi. Mezclado.

Figura 24.

Balance de masa para el proceso de precipitación.



NÚMERO CORRIENTE	23		22		24	
Flujo	F12	164.639	F13	4157.139	F14	8231.95
Unidad	$\frac{\text{kg agua+glicerol}}{\text{día}}$		$\frac{\text{kg pectina}}{\text{día}}$		$\frac{\text{l solución formadora}}{\text{día}}$	

Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente de entrada y salida del proceso de mezclado.

Al tener 164.64 kg de pectina y la película requerida es de una concentración del 4% p/v se agregan la siguiente cantidad de agua

$$164.64 \frac{\text{kg pectina}}{\text{día}} * \frac{100 \text{ ml}}{4 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ l}} = 4116 \frac{\text{l solución}}{\text{día}}$$

$$4116 \frac{\text{litro agua destilada}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ l}} = 4116 \frac{\text{kg agua destilada}}{\text{día}}$$

Por otro lado, en un tanque reservorio el glicerol es diluido a una concentración de 1%p/v y se requiere la misma cantidad de litros obtenida para la solución con pectina

$$4116 \frac{\text{l solución}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ g}}{100 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 41.16 \frac{\text{kg glicerol}}{\text{día}}$$

$$41.16 \frac{\text{kg glicerol}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ l}}{1.26 \text{ kg}} = 32.67 \frac{\text{l glicerol}}{\text{día}}$$

$$4116 \frac{\text{l solución}}{\text{día}} - 32.67 \frac{\text{l glicerol}}{\text{día}} = 4083.33 \frac{\text{l agua destilada}}{\text{día}}$$

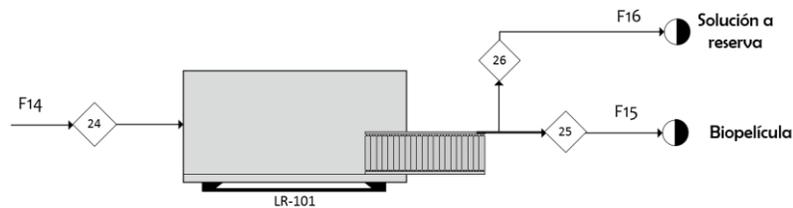
Finalmente se mezclan las dos soluciones

$$4116 \frac{\text{l solución}}{\text{día}} + 4116 \frac{\text{l solución}}{\text{día}} = 8232 \frac{\text{l solución formadora de película}}{\text{día}}$$

3.3.1.vii. Casting continuo.

Figura 25.

Balace de masa para el proceso de precipitación.



NÚMERO CORRIENTE	24		25		26	
Flujo	F14	8231.95	F15	2800	F16	7960
Unidad	$\frac{\text{l solución formadora}}{\text{día}}$		$\frac{\text{m biopelícula}}{\text{día}}$		$\frac{\text{m biopelícula}}{\text{día}}$	

Nota. La figura evidencia los flujos correspondientes a cada corriente de entrada y salida del proceso de casting continuo.

La máquina de la línea de revestimiento de bandas cuenta con un ancho de banda de 450mm; de acuerdo a revisión bibliográfica, para estas máquinas es necesario ajustar un espesor de 1,7mm[94] obteniendo mediante la relación de solución formadora y los metros cuadrados de la máquina 10760 m/día de biopelícula como se muestra a continuación.

$$450 \text{ mm ancho} * 1.7 \text{ mm espesor} = 765 \text{ mm}^2 * \frac{1 \text{ m}^2}{(1000 \text{ mm})^2} = 7.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$8232 \frac{\text{l}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 8.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\frac{8.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{7.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 10758.17 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Teniendo en cuenta que la máquina opera a una máxima velocidad de 2 m/min, se pretende adquirir una máquina de este tipo, que produce 2800 m biopelícula/día, por tanto, se requiere 4 máquinas en total para una capacidad de planta de 11200 m de biopelícula/día; para mantener esta producción se tendrá en cuenta que en los periodos de poca cosecha se puede realizar contratos comerciales con fincas cercanas.

Posteriormente, mediante el Anexo 4, se evidencia el proceso de extracción de pectina y elaboración de biopelícula escalado de nivel laboratorio a planta piloto. Sin embargo, se observa que los procesos de filtrado 2 y reprecipitación pueden optimizarse, este procedimiento se observa en el Anexo 4 en la figura 32.

Una vez establecido el proceso, mediante la tabla 11 se muestran las especificaciones técnicas y condiciones de operación que deben contener los equipos durante el proceso, teniendo en cuenta un sobredimensionamiento de 20% en los tanques.

Tabla 11.

Especificaciones técnicas y condiciones de operación de los equipos utilizados.

Equipo	Modelo	Especificación/Condición	Parámetros de diseño
<p>Tanque abierto encaquetado</p> 	GSH-6000L	El tanque contará con un volumen de 6000L, su material será de acero inoxidable (304, 316L o 321), el tipo de calentamiento será mediante vapor a través de la chaqueta por ranura constante y contará con un agitador vertical de tipo axial. Este funcionará a una temperatura de 70°C.	<p>V= 6000L T=70°C t =45min H=2.58m D=1.72m</p>
<p>Filtro prensa</p> 	XAMY2 0/800-UB	El filtro tendrá un área de filtración de 20,61 m ² , contando con un tamaño de placa de 800 x 800 mm hechas en polipropileno, con alta elasticidad y peso liviano, así mismo, tienen resistencia a la corrosión acida y alcalina, son inoloros y no son tóxicos. El espesor de torta es 32 mm y números de cámaras de 48.	<p>Área de filtración: 20,61 m² Tamaño de placa: 800 x 800 mm Espesor de torta: 32 mm Números de cámaras: 48</p>

<p>Tanque cerrado enchaquetado</p> 	<p>ZH-11000L</p>	<p>Este tanque contará con un volumen de 11000L, disponible con una chaqueta de enfriamiento de una sola capa con agua de proceso, el material será de acero inoxidable (304-316L).</p>	<p>Volumen : 11000L T :35°C H=3.16m D=2.11m</p>
<p>Secador de bandejas</p> 	<p>CT-C-III</p>	<p>Este equipo contará con una capacidad de carga de 360 kg/lote, un flujo de aire de 10350 m/h, sus dimensiones serán de 3220 largo x2200 ancho x2000alto. El material es de acero inoxidable (304, 304L o 316) y contiene 144 bandejas.</p>	<p>T: 40°C # bandejas: 144 Humedad final: 35% Capacidad de carga: 360 kg/lote</p>
<p>Tanque mezclador enchaquetado</p> 	<p>ZH-11000L</p>	<p>Este tanque contará con un volumen de 11000L, disponible con una chaqueta de calentamiento con vapor de doble capa, el material será de acero inoxidable (304-316L) y contará con un agitador de tipo axial vertical.</p>	<p>V=11000L T=80°C H=3.16m D=2.11m</p>
<p>Líneas de revestimiento de bandas</p> 	<p>DYG-130-500-6M</p>	<p>El equipo estará fabricado de acero inoxidable, con un ancho de banda de 450mm y según la temperatura trabajada, se ajustará la velocidad de la banda comprendida entre 0-5 m/min.</p>	<p>Ancho banda: 450 mm Velocidad: 0-5 m/min T: 80°C</p>

Nota. La tabla contiene especificaciones técnicas, condiciones de operación y modelos de los equipos utilizados en la extracción de pectina y elaboración de películas.

3.4. Estimación de los costos generados en la extracción de pectinas de mucílago de café y la elaboración de biopelículas

Una vez establecidas las especificaciones técnicas de los equipos, se obtuvo un precio estimado de cada uno de estos con modelos de equipos estándar mostrados a continuación en la tabla 12.

Tabla 12.
Precios de equipos requeridos.

EQUIPO	CANTIDAD	PRECIO (USD)	PRECIO (COP)
GSH-5500L	1	57.230	211.172.404
XAMY20/1250-UB	2	9.300	34.315.977
ZH-10000L	1	2.185	8.062.409
CT-C-III	1	5.500	20.294.395
ZH-10000L	1	2.185	8.062.409
DYG-130-500-6M	4	80.000	295.191.200
Total		96.400	577.098.796

Nota. La tabla 12 Los datos reflejados en pesos colombianos fueron en base a la TRM del día 28 de marzo del 2021, la cual es de 3689,89 COP.

Figura 26.

Depreciación de los equipos industriales requeridos.

Depreciación de Maquinaria y equipo (cifras en pesos)					
Elemento	Cantidad	Precio unitario	Valor total	Vida útil (años)	Depreciación
Tanque abierto enchaquetado	1	\$ 211.172.405	\$ 211.172.405	10	21.117.240
Filtro prensa	2	\$ 17.157.989	\$ 34.315.977	10	3.431.598
Tanque cerrado enchaquetado	1	\$ 8.062.410	\$ 8.062.410	10	806.241
Secador de bandejas	1	\$ 20.294.395	\$ 20.294.395	10	2.029.440
Mezclador	1	\$ 8.062.410	\$ 8.062.410	10	806.241
Línea de revestimiento	4	\$ 73.797.800	\$ 295.191.200	10	29.519.120
					57.709.880

Nota. La figura muestra la depreciación para cada uno de los equipos a 10 años.

Posteriormente, se evaluó el precio de la materia prima (mucílago de café) encontrando que al día 28 de marzo de 2021, no tiene un valor comercial pues representa un problema para los caficultores y, por lo tanto, no trae beneficios económicos, por otro lado, la logística del transporte de la materia prima no se tiene en cuenta porque la planta piloto estará acoplada al proceso de desmucilaginado en la Finca La Argelia. Por consiguiente, solo se evalúan los costos de los insumos del proceso reflejados en la Tabla 13, teniendo en cuenta una recuperación del etanol esperada del 80%.

Tabla 13.

Precio y cantidad anual requerida para cada uno de los insumos del proceso.

Insumo	Unidad	Precio unitario COP	Cantidad anual	Total (COP)
Glicerol	Kg	9.500	15.025	142.737.500
Etanol 95%	Gal	13.000	81.067	1.053.871.000
Hidróxido de sodio	Gal	10.500	4.723	49.591.500
Agua destilada	Gal	5.000	790.605	3.953.025.000
Ácido sulfúrico	Gal	38.000	2.814	106.932.000
Total				5.306.157.000

Nota. La tabla muestra el precio y la cantidad anual de los insumos del proceso de extracción de pectina y elaboración de películas.

La biopelícula obtenida de la pectina extraída del mucílago de café actúa como producto sustituto de los plásticos stretch constituidos por polietileno, empleados en procesos de empaque y embalaje. Este producto en el mercado tiene un precio de aproximadamente 5790 COP por rollo de 20 metros con ancho de 45 cm, por lo tanto la película con estas mismas dimensiones tendrá este valor, agregando un 40% correspondiente al valor agregado que genera el ser un producto sostenible para el medio ambiente. En la tabla 14 se muestra el ingreso operacional de acuerdo al precio de venta de la biopelícula.

Tabla 14.

Precio de venta de la biopelícula.

Producto	Unidad	Precio Unitario COP	Cantidad anual (m)	Total COP
Biopelícula	m	405	3.927.400	1.590.597.000

Nota. La tabla contiene el ingreso operacional del proyecto de acuerdo al precio de venta de la película.

Para finalizar, se calcularon indicadores financieros como el VPN, TIR, relación Costo/beneficio, teniendo en cuenta que el costo de los equipos es la inversión inicial del proyecto, los costos de materia prima e insumos son los egresos y el valor comercial de la película como producto sustituto es el ingreso operacional. Adicionalmente, la depreciación de los equipos es a 10 años según el artículo 137 del estatuto tributario [95], las adecuaciones del terreno y la nómina respectiva para el funcionamiento de la

planta no se toman en cuenta en los cálculos debido a que el terreno estaría disponible en la finca La Argelia, mientras que la nómina corresponde al personal administrativo y técnico con el que ya cuenta la empresa.

Figura 27.

Flujo de caja del proyecto.

	IPC	1,61%	Impuestos	33%							
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS											
Ingresos operacionales	maquinaria y equipo	1.590.597.000	1.616.205.612	1.642.226.522	1.668.666.369	1.695.531.898	1.722.829.961	1.750.567.524	1.778.751.661	1.807.389.562	1.836.488.534
EGRESOS											
(-) Insumos		5.306.157.000	5.391.586.128	5.478.390.664	5.566.592.754	5.656.214.897	5.747.279.957	5.839.811.165	5.933.832.124	6.029.366.822	6.126.439.627
(-) Depreciación		57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880
FLUJO NETO / GANANCIAS GRABABLES		(3.773.269.880)	(3.833.090.396)	(3.893.874.022)	(3.955.636.265)	(4.018.392.880)	(4.082.159.876)	(4.146.953.521)	(4.212.790.344)	(4.279.687.139)	(4.347.660.973)
(-) Impuestos		(1.245.179.060)	(1.264.919.831)	(1.284.978.427)	(1.305.359.967)	(1.326.069.650)	(1.347.112.759)	(1.368.494.662)	(1.390.220.813)	(1.412.296.756)	(1.434.728.121)
GANANCIAS NETAS		(2.528.090.820)	(2.568.170.565)	(2.608.895.595)	(2.650.276.298)	(2.692.323.229)	(2.735.047.117)	(2.778.458.859)	(2.822.569.530)	(2.867.390.383)	(2.912.932.852)
(+) Depreciación		57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880	57.709.880
Costos de inversión	577.098.796,00										
FLUJO DE FONDOS NETO	(577.098.796,00)	(2.470.380.940)	(2.510.460.685)	(2.551.185.715)	(2.592.566.418)	(2.634.613.349)	(2.677.337.237)	(2.720.748.979)	(2.764.859.650)	(2.809.680.503)	(2.855.222.972)

		DTF	IPC	Rentabilidad mínima
Tasa de interés de oportunidad (%)	14%	4,53%	1,61%	8%
Valor actual	-\$ 13.558.318.337			
Indicadores de Bondad Financiera				
VPN	-\$ 14.135.417.133			
TIR	#¡NUM!			
VP flujo de ingresos VNA (ingresos)	\$ 8.726.097.169			
VP flujo de egresos VNA (costos)	\$ 29.986.333.642			
R B/C	0,29			

Nota. La figura muestra el flujo de caja obtenido con el cálculo de los indicadores económicos.

Con base a los resultados obtenidos en la figura 27 sobre los indicadores de bondad financiera como lo son el VPN, TIR y R B/C podemos establecer que este proyecto no es financieramente viable. El valor obtenido de VPN (-14.155.417.133) nos dice que no se recupera la inversión realizada en el periodo del proyecto (577.098.796) y por lo tanto tampoco se obtienen ganancias que hagan factible la realización de este proyecto. Al obtener una predicción de rentabilidad (TIR) nula, junto con el análisis de Relación B/C (0.29), los costos son mayores que los beneficios, un factor más para la inviabilidad de la planta piloto.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló una biopelícula a partir de pectina de mucílago de café, basados en la metodología de Jessica García, Mariana Valdespino y Luisa Márquez, quienes emplearon la misma materia prima para extraer la pectina y en el caso de Mariana Valdespino quien elaboró películas con esta. A su vez, se seleccionó el método de extracción por hidrólisis ácida para la extracción de pectina, se elaboraron las biopelículas y se evaluaron sus propiedades, finalmente se especificaron los equipos y condiciones del proceso a escala planta piloto para posteriormente estimar los costos y determinar la viabilidad financiera.

Los métodos de extracción de pectinas se analizaron según cinco criterios establecidos por las autoras, los cuales presentaron diferentes niveles de importancia de acuerdo a las necesidades y los recursos económicos con los cuales contaba el proyecto, teniendo en primer lugar la comparación en la disponibilidad de equipos para la experimentación y la revisión bibliográfica específica de cada método en la extracción de pectina de mucílago de café, en segundo lugar el rendimiento obtenido en cada método y por último los costos de implementación del proceso y el consumo de energía asociado. Por lo anterior, de acuerdo a una tabla de ponderación, el método por hidrólisis ácida es el que cumple con una gran parte de los requisitos establecidos con una calificación de 4.5 de 5. Luego, fue extraída la pectina por este método observando que tiene un peso equivalente de 1693.33 mg/meq, una acidez libre de 0.59 meq/g, un porcentaje de metoxilo de 4.88% y un grado de esterificación de 72.72%.

Se evaluó la propiedad de permeabilidad al vapor de agua, teniendo en cuenta pruebas previas realizadas con pectina cítrica que permitieron descartar concentraciones de pectina, glicerol y aditivos innecesarios como el Tween 80 y el aceite mineral. Una vez elegida la película de mejor concentración, por medio del diseño de experimentos se encontró que la película de solo pectina de mucílago de café no cumplía con los requerimientos para realizar las pruebas, por tal razón fue descartada y con la película compuesta y película de pectina cítrica esta propiedad tuvo valores de $2.93 \cdot 10^{-11}$ g/Pa*s*m y $2.97 \cdot 10^{-11}$ g/ Pa*s*m respectivamente, indicando valores mayores a los reportados, lo cual tenderá a afectar la aplicación de esta como recubrimiento.

Al realizar el balance de masa según lo obtenido a escala laboratorio, se describió las especificaciones técnicas y condiciones del proceso proyectado a nivel planta piloto, observando un diseño básico de dimensionamiento de equipos donde los factores principales fueron el volumen, área, material de construcción y características propias de cada equipo como espesor de torta y número de cámaras para el filtro de prensa, número de bandejas y capacidad de carga para el secador, y finalmente el ancho de banda para la líneas de revestimiento. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el sobredimensionamiento de los tanques correspondiente a un 20%; en cuanto a las condiciones de proceso, la temperatura y tiempo de residencia fueron las variables especificadas. De acuerdo a lo anterior, se realizó un diagrama PFD en donde se contempló el balance de materia y las condiciones de proceso, evidenciando una posible optimización en los equipos de filtración y precipitación.

Al llevar a cabo el flujo efectivo del proyecto se consideraron los ingresos operacionales, la inversión de equipos y los costos de insumos, posteriormente se estimó los indicadores financieros como VPN, TIR y R B/C, dando como resultado la no viabilidad del proyecto puesto que el producto a reemplazar (plásticos stretch) comercialmente tiene un precio por debajo del valor al que se puede producir la biopelícula de pectina de mucílago de café, aun cuando se aumentó en un 40% el precio de la biopelícula por concepto de valor agregado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, “Ensayos sobre ECONOMÍA CAFETERA,” vol. 3590, no. 33, 2019.
- [2] H. A. Mendoza Yalibat, “Extracción De Pectinas a Partir De Mucílago Contenido En Las Aguas Mielles Del Beneficiado De Café Por Maceración Dinámica Y Estática,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.
- [3] N. Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” *Av. Técnicos Cenicafe*, no. 3, p. 8, 2010, [Online]. Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>.
- [4] S. Ríos and G. I. Puerta, “Composición Química Del Mucílago De Café, Según El Tiempo De Fermentación Y Refrigeración,” *Cenicafe*, vol. 2, no. 62, pp. 23–40, 2011, [Online]. Available: <http://www.cenicafe.org/es/documents/2.pdf>.
- [5] P. L. Bush, “Pectin: Chemical Properties, Uses and Health Benefits: EBSCOhost,” 2014. <https://web-a-ebSCOhost-com.ezproxy.uamerica.edu.co/ehost/detail/detail?vid=3&sid=713a8767-d0ce-4c37-9a73-1f262ef105cd%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3D#AN=821904&db=e000xww> (accessed Feb. 08, 2021).
- [6] EL TIEMPO, “¿Qué porcentaje de residuos y materiales recicla Colombia? - Medio Ambiente - Vida - ELTIEMPO.COM,” 2019. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/que-porcentaje-de-residuos-y-materiales-recicla-colombia-363052> (accessed Mar. 17, 2021).
- [7] Cenicafe, “Guia de CENICAFE para el beneficiado del cafe - RevistaElCafetalero.com by El Cafetalero - issuu.” https://issuu.com/revistaelcafetalero/docs/guia_beneficiado_cenicafe (accessed Feb. 08, 2021).
- [8] F. A. Cristancho Aguirre, “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE DESMUCILAGINACION DEL CAFÉ CON EXTRACTOS VEGETALES EN LA FINCA ‘LA PEDREGOSA’ MUNICIPIO

DE ANOLAIMA - CUNDINAMARCA,” 2015.

- [9] G. I. Puerta Quintero, “Factores, Procesos Y Controles En La Fermentación Del Café,” *Av. Técnicos Cenicafe*, vol. 1, no. 422, pp. 1–12, 2012, [Online]. Available: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0461.pdf>.
- [10] D. Arriola and R. Garcia, “Caracterización química de la pectina obtenida de desechos del beneficiado de café - Dialnet.” <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5155278> (accessed Feb. 08, 2021).
- [11] M. Marić, A. N. Grassino, Z. Zhu, F. J. Barba, M. Brnčić, and S. Rimac Brnčić, “An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 76, pp. 28–37, 2018, doi: 10.1016/j.tifs.2018.03.022.
- [12] E. Cabarcas Henao, A. F. Guerra Benedetti, and C. A. Henado Balseiro, “EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PECTINA APARTIR DE CÁSCARAS DE PLÁTANO PARA DESARROLLAR UN DISEÑO GENERAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN,” Universidad de cartagena, 2012.
- [13] J. Prakash Maran, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and R. Sridhar, “Microwave assisted extraction of pectin from waste Citrullus lanatus fruit rinds,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 101, no. 1, pp. 786–791, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2013.09.062.
- [14] H. S. Jeong, H. Y. Kim, S. H. Ahn, S. C. Oh, I. Yang, and I. G. Choi, “Optimization of enzymatic hydrolysis conditions for extraction of pectin from rapeseed cake (*Brassica napus* L.) using commercial enzymes,” *Food Chem.*, vol. 157, pp. 332–338, 2014, doi: 10.1016/j.foodchem.2014.02.040.
- [15] O. Yulianti, K. K. T. Goh, L. Matia-Merino, J. Mawson, and C. Brennan, “Extraction and characterisation of pomace pectin from gold kiwifruit (*Actinidia chinensis*),” *Food Chem.*, vol. 187, pp. 290–296, 2015, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.03.148.
- [16] A. Wikiera, M. Mika, A. Starzyńska-Janiszewska, and B. Stodolak, “Application of Celluclast 1.5L in apple pectin extraction,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 134, pp. 251–257, 2015, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.07.051.

- [17] M. Kumar *et al.*, “Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 105, no. August, pp. 223–237, 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.09.009.
- [18] F. R. B. Marena *et al.*, “Advances in Studies Using Vegetable Wastes to Obtain Pectic Substances: A Review,” *J. Polym. Environ.*, vol. 27, no. 3, pp. 549–560, 2019, doi: 10.1007/s10924-018-1355-8.
- [19] G. Mao *et al.*, “Reconsidering conventional and innovative methods for pectin extraction from fruit and vegetable waste: Targeting rhamnogalacturonan I,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 94, pp. 65–78, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.11.001.
- [20] J. I. García Palma, “Evaluación Del Rendimiento De Extracción De Procedentes De Desmucilaginado Mecánico,” Universidad de el salvador, 2009.
- [21] P. J. P. Espitia, W. X. Du, R. de J. Avena-Bustillos, N. de F. F. Soares, and T. H. McHugh, “Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review,” *Food Hydrocoll.*, vol. 35, pp. 287–296, 2014, doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.06.005.
- [22] D. Sánchez Aldana, J. C. Contreras-Esquivel, G. V. Nevárez-Moorillón, and C. N. Aguilar, “Caracterización de películas comestibles a base de extractos pécticos y aceite esencial de limón Mexicano,” *CYTA - J. Food*, vol. 13, no. 1, pp. 17–25, 2015, doi: 10.1080/19476337.2014.904929.
- [23] MADS, “Vertimientos y reuso de aguas residuales | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,” 2020. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales> (accessed Feb. 08, 2021).
- [24] Ministerio de Salud y Protección Social, “Resolución 4143 de 2012,” 2012. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4143-de-2012.pdf> (accessed Feb. 08, 2021).
- [25] J. L. Sorrels and T. G. Walton, “Cost Estimation: Concepts and Methodology,” *Epa Air Pollut. Control Cost Man.*, pp. 1–45, 2017.
- [26] C. M. P. Freitas, R. C. S. Sousa, M. M. S. Dias, and J. S. R. Coimbra, “Extraction

- of Pectin from Passion Fruit Peel,” *Food Eng. Rev.*, vol. 12, no. 4, pp. 460–472, 2020, doi: 10.1007/s12393-020-09254-9.
- [27] P. Methacanon, J. Krongsin, and C. Gamonpilas, “Pomelo (*Citrus maxima*) pectin: Effects of extraction parameters and its properties,” *Food Hydrocoll.*, vol. 35, pp. 383–391, 2014, doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.06.018.
- [28] ASTM, *ASTM D1293-18 Standard Test Methods for pH of Water*, vol. 99, no. Reapproved 2005. 2006.
- [29] ASTM, *ASTM D1218-12 Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids*, vol. 12, no. Reapproved 2016. 2008.
- [30] M. Valdespino-León *et al.*, “Biodegradable Electrospayed Pectin Films: An Alternative to Valorize Coffee Mucilage,” *Waste and Biomass Valorization*, no. 0123456789, 2020, doi: 10.1007/s12649-020-01194-z.
- [31] O. F. Science *et al.*, “Characterization of coffee pectin . García , R ; Characterization of Coffee Pectin,” vol. 24, no. January, pp. 125–129, 2016.
- [32] USP, “1995 The United States Pharmacopeia/the National Formulary - Usp - Google Libros.”
https://books.google.com.co/books/about/1995_The_United_States_Pharmacopeia_the.html?id=zP8ezQEACAAJ&redir_esc=y (accessed Feb. 14, 2021).
- [33] L. M. Marquez Cadavid and B. V. Ledesma Chiquito, “VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE AGUAMIEL DEL CAFÉ PARA LA OBTENCIÓN DE POLISACÁRIDOS,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [34] H. S. Owens, R. . Mccready, A. . Shepherd, J. . Miers, R. . Earlandsed, and W. . Maclay, “Methods used at Western Regional Research Laboratory for extraction and analysis of pectic materials,” *West. Reg. Res. Lab. Albany, Calif*, 1952, Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://archive.org/details/methodsusedatwes340owen>.
- [35] N. Chiviri Torres and G. J. Palencia Suarez, “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE UNA BIOPELÍCULA UTILIZANDO PECTINA EXTRAÍDA ENZIMÁTICAMENTE DE LA CÁSCARA DE NARANJA VALENCIANA,” *Univ. américa*, pp. 138–155, 2019.
- [36] D. F. López, O. Osorio, and O. E. Checa, “Propiedades Mecánicas de un Material

- de Pectina para Revestimiento de Fibras Naturales Utilizadas en Aplicaciones Agrícolas,” *Inf. tecnológica*, vol. 30, no. 3, pp. 189–198, 2019, doi: 10.4067/s0718-07642019000300189.
- [37] H. G. R. Younis and G. Zhao, “Physicochemical properties of the edible films from the blends of high methoxyl apple pectin and chitosan,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 131, pp. 1057–1066, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.096.
- [38] Rosida, Sudaryati, and A. M. Yahya, “Edible Film from the Pectin of Papaya Skin (The Study of Cassava Starch and Glycerol Addition),” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 953, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/953/1/012248.
- [39] D. C. Moncayo Martinez, “Desarrollo de un recubrimiento comestible a partir de un biopolimero para prolongar la vida útil de frutas frescas,” *Univ. Nac. Colomb. Programa interfacultades, Maest. en Cienc. y Tecnol. Aliment.*, p. 76, 2013.
- [40] ASTM, “Standard test methods for water vapor transmission of materials- E96/E96-05. Philadelphia,” vol. 10, pp. 1–9, 2005.
- [41] ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International,” *Www.Astm.Org*, pp. 1–12, 2002, doi: 10.1520/D0882-18.
- [42] G. Baca Currea, “Ingenieria-Economica-Guillermo-Baca-Currea.Pdf.” pp. 43–53, 2005, [Online]. Available: <https://catedrafinancierags.files.wordpress.com/2014/09/ingenieria-economica-guillermo-baca-currea.pdf>.
- [43] D. E. Molina Soler, “Extracción de pectina de frutos amazónicos mediante un proceso asistido por microondas,” *Food Bioprod. Process.*, p. 123, 2016, [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/54961/>.
- [44] S. Jokić, K. Aladić, and D. Šubarić, “Subcritical Water Extraction Laboratory Plant Design and Application,” *Annu. Croat. Acad. Eng.*, vol. 21, pp. 247–258, 2018.
- [45] D. Q. Li, X. Jia, Z. Wei, and Z. Y. Liu, “Box-Behnken experimental design for investigation of microwave-assisted extracted sugar beet pulp pectin,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 88, no. 1, pp. 342–346, 2012, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.12.017.
- [46] S. Yeoh, J. Shi, and T. A. G. Langrish, “Comparisons between different techniques for water-based extraction of pectin from orange peels,” *Desalination*, vol. 218, no. 1–3, pp. 229–237, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.02.018.

- [47] S. Q. Liew, W. H. Teoh, R. Yusoff, and G. C. Ngoh, "Comparisons of process intensifying methods in the extraction of pectin from pomelo peel," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 143, no. June, p. 107586, 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.107586.
- [48] F. Jafari, F. Khodaiyan, H. Kiani, and S. S. Hosseini, "Pectin from carrot pomace: Optimization of extraction and physicochemical properties," *Carbohydr. Polym.*, vol. 157, pp. 1315–1322, 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2016.11.013.
- [49] T. Í. S. Oliveira *et al.*, "Optimization of pectin extraction from banana peels with citric acid by using response surface methodology," *Food Chem.*, vol. 198, no. January, pp. 113–118, 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.080.
- [50] E. Polanco-Lugo *et al.*, "Citrus pectin obtained by ultrasound-assisted extraction: Physicochemical, structural, rheological and functional properties," *CYTA - J. Food*, vol. 17, no. 1, pp. 463–471, 2019, doi: 10.1080/19476337.2019.1600036.
- [51] N. Bayar, T. Bouallegue, M. Achour, M. Kriaa, A. Bougatef, and R. Kammoun, "Ultrasonic extraction of pectin from *Opuntia ficus indica* cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties.," *Food Chem.*, vol. 235, pp. 275–282, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.05.029.
- [52] C. Freitas de Oliveira, D. Giordani, R. Lutckemier, P. D. Gurak, F. Cladera-Olivera, and L. D. Ferreira Marczak, "Extraction of pectin from passion fruit peel assisted by ultrasound," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 71, pp. 110–115, 2016, doi: 10.1016/j.lwt.2016.03.027.
- [53] A. N. Grassino, M. Brnčić, D. Vikić-Topić, S. Roca, M. Dent, and S. R. Brnčić, "Ultrasound assisted extraction and characterization of pectin from tomato waste," *Food Chem.*, vol. 198, pp. 93–100, 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.11.095.
- [54] J. Mota, C. Muro, J. Illescas, O. A. Hernández, A. Tecante, and E. Rivera, "Extraction and Characterization of Pectin from the Fruit Peel of *Opuntia robusta*," *ChemistrySelect*, vol. 5, no. 37, pp. 11446–11452, 2020, doi: 10.1002/slct.202002181.
- [55] F. Khodaiyan and K. Parastouei, "Co-optimization of pectin and polyphenols extraction from black mulberry pomace using an eco-friendly technique:

- Simultaneous recovery and characterization of products,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 164, pp. 1025–1036, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.07.107.
- [56] N. Bayar, M. Friji, and R. Kammoun, “Optimization of enzymatic extraction of pectin from *Opuntia ficus indica* cladodes after mucilage removal,” *Food Chem.*, vol. 241, pp. 127–134, 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.08.051.
- [57] J. Vasco-Correa and A. D. Zapata Zapata, “Enzymatic extraction of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) at laboratory and bench scale,” *Lwt*, vol. 80, pp. 280–285, 2017, doi: 10.1016/j.lwt.2017.02.024.
- [58] X. Wang, Q. Chen, and X. Lü, “Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water,” *Food Hydrocoll.*, vol. 38, pp. 129–137, 2014, doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.12.003.
- [59] N. Muñoz-Almagro, L. Valadez-Carmona, J. A. Mendiola, E. Ibáñez, and M. Villamiel, “Structural characterisation of pectin obtained from cacao pod husk. Comparison of conventional and subcritical water extraction,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 217, no. April, pp. 69–78, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.04.040.
- [60] X. Ma, J. Jing, J. Wang, J. Xu, and Z. Hu, “Extraction of Low Methoxyl Pectin from Fresh Sunflower Heads by Subcritical Water Extraction,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 25, pp. 15095–15104, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c00928.
- [61] B. KAYA, “Extraction of Pectin From Sugar Beet Pulp By High,” 2020.
- [62] X. Guo *et al.*, “Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: A comparison,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 88, no. 2, pp. 441–448, 2012, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.12.026.
- [63] M. Naghshineh, K. Olsen, and C. A. Georgiou, “Sustainable production of pectin from lime peel by high hydrostatic pressure treatment,” *Food Chem.*, vol. 136, no. 2, pp. 472–478, 2013, doi: 10.1016/j.foodchem.2012.08.036.
- [64] Y. Yang, Z. Wang, D. Hu, K. Xiao, and J. Y. Wu, “Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process,” *Food Hydrocoll.*, vol. 79, pp. 189–196, 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.11.051.
- [65] H. M. Chen, X. Fu, and Z. G. Luo, “Properties and extraction of pectin-enriched materials from sugar beet pulp by ultrasonic-assisted treatment combined with subcritical water,” *Food Chem.*, vol. 168, pp. 302–310, 2015, doi:

- 10.1016/j.foodchem.2014.07.078.
- [66] C. F. de Oliveira, P. D. Gurak, F. Cladera-Olivera, L. D. F. Marczak, and M. Karwe, "Combined Effect of High-Pressure and Conventional Heating on Pectin Extraction from Passion Fruit Peel," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 1021–1030, 2016, doi: 10.1007/s11947-016-1691-4.
- [67] C. A. Perussello, Z. Zhang, A. Marzocchella, and B. K. Tiwari, "Valorization of Apple Pomace by Extraction of Valuable Compounds," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 16, no. 5, pp. 776–796, 2017, doi: 10.1111/1541-4337.12290.
- [68] L. R. Adetunji, A. Adekunle, V. Orsat, and V. Raghavan, "Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review," *Food Hydrocoll.*, vol. 62, pp. 239–250, 2017, doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.08.015.
- [69] F. Dranca and M. Oroian, "Optimization of Pectin Enzymatic Extraction from *Malus domestica* 'Fălticeni' Apple Pomace with Celluclast 1.5L," *molecules*, pp. 1–13, 2019.
- [70] M. Dominiak *et al.*, "Application of enzymes for efficient extraction, modification, and development of functional properties of lime pectin," *Food Hydrocoll.*, vol. 40, pp. 273–282, 2014, doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.03.009.
- [71] H. Moronta, A. Espaillat, A. Escarráman, and S. Lagunes, "Caracterización química de subproductos obtenidos del beneficiado del café," *Rev. APF*, vol. 6, no. 1, pp. 11–16, 2017.
- [72] S. Avallone, J. P. Guiraud, B. Guyot, E. Olguin, and J. M. Brillouet, "Polysaccharide constituents of coffee-bean mucilage," *J. Food Sci.*, vol. 65, no. 8, pp. 1308–1311, 2000, doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb10602.x.
- [73] ICONTEC, "NTC 4519. Recuento de mesófilos," no. 571, 2009.
- [74] N. Técnica, "NTC," no. 571, 2009.
- [75] M. C. Apolo Cisneros, "Estudio comparativo del rendimiento de la obtención de pectina a partir de los residuos de especies del género *Passiflora* mediante hidrólisis con diferentes ácidos.," Universidad Central de Ecuador, 2019.
- [76] V. Acevedo Berger and D. M. Ramirez Diaz, "ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA PECTINA, A PARTIR DE LA CÁSCARA DE LA NARANJA (*Citrus sinensis*)," Universidad de San Buenaventura Cali, 2011.

- [77] E. Matta and N. Bertola, "Development and characterization of high methoxyl pectin film by using isomalt as plasticizer," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, no. 8, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1111/jfpp.14568.
- [78] D. Fernández Valdés, S. Bautista Baños, D. Fernández Valdés, A. Ocampo Ramírez, A. García Pereira, and A. Falcón Rodríguez, "Películas y recubrimientos comestibles : una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas Eatable films and coverings : a favorable alternative in the postharvesting . conservation of fruits and vegetables," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 24, no. 3, pp. 52–57, 2015, [Online]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v24n3/rcta08315.pdf>.
- [79] V. L. Arévalo Alvarenga, G. A. Azucena Peña, and S. E. Laínez Amaya, "Formulación y caracterización de una biopelícula comestible elaborada a partir de almidón de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) y yuca (*Manihot esculenta*)," Universidad El Salvador, 2018.
- [80] E. A. Mayhuire, Y. Cuadros Huamaní, L. M. Zanardi, and E. Medina De Miranda, "Biopelículas producidas con cáscara de naranja y reforzadas con celulosa bacteriana BIOPELÍCULAS PRODUCIDAS CON CÁSCARA DE NARANJA Y REFORZADAS CON CELULOSA BACTERIANA BIODEGRADABLE FILMS PRODUCED WITH ORANGE PEEL AND REINFORCED BY BACTERIAL CELLULOSE," *Rev Soc Quím Perú*, vol. 85, no. 2, 2019.
- [81] T. M. P. Ngo, T. H. Nguyen, T. M. Q. Dang, T. X. Tran, and P. Rachtanapun, "Characteristics and antimicrobial properties of active edible films based on pectin and nanochitosan," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 6, 2020, doi: 10.3390/ijms21062224.
- [82] J. Prachayawarakorn and S. Poomkaew, "Property Improvement of Biodegradable High-Methoxy Pectin Film by Different Contents of Dialdehyde Starch," *J. Polym. Environ.*, vol. 28, no. 8, pp. 2227–2235, 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01767-y.
- [83] Rosida, Sudaryati, and A. M. Yahya, "Edible Film from the Pectin of Papaya Skin (The Study of Cassava Starch and Glycerol Addition)," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 953, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/953/1/012248.
- [84] S. Galus, A. Turska, and A. Lenart, "Sorption and wetting properties of pectin edible

- films,” *Czech J. Food Sci.*, vol. 30, no. 5, pp. 446–455, 2012, doi: 10.17221/444/2011-cjfs.
- [85] Y. Adjouman, C. Nindjin, F. Tetchi, A. Dalcq, N. Amani, and M. Sindic, “Water Vapor Permeability of Edible Films Based on Improved Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Native Starches,” *J. Food Process. Technol.*, vol. 08, no. 03, 2017, doi: 10.4172/2157-7110.1000665.
- [86] P. Cazón, M. Vázquez, and G. Velazquez, *Novel composite films based on cellulose reinforced with chitosan and polyvinyl alcohol: Effect on mechanical properties and water vapour permeability*, vol. 69. Elsevier Ltd, 2018.
- [87] D. Joaqui and H. Villada, “Propiedades Ópticas Y Permeabilidad Producidas a Partir De Almidón Optical Properties and Water Vapor Permeability in Films Produced From Starch Propiedades Ópticas E Permeabilidade,” *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial Edición*, vol. 2, no. 2, pp. 59–68, 2013.
- [88] Y. Estrada-Girón, E. Cabrera-Díaz, R. M. Esparza-Merino, A. Martín-del-Campo, and A. J. Valencia-Botín, “Innovative edible films and coatings based on red color pectin obtained from the byproducts of *Hibiscus sabdariffa* L. for strawberry preservation,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 14, no. 6, pp. 3371–3380, 2020, doi: 10.1007/s11694-020-00577-z.
- [89] A. H. Bedane, M. Eić, M. Farmahini-Farahani, and H. Xiao, “Water vapor transport properties of regenerated cellulose and nanofibrillated cellulose films,” *J. Memb. Sci.*, vol. 493, pp. 46–57, 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2015.06.009.
- [90] M. Zavala, J. Castañeda, M. Rivera, and D. la F. Norma, “Evaluación De Propiedades Mecánicas Y Permeabilidad Al Vapor De Agua De Películas De Quitosano,” *Jóvenes en la Ciencia, Rev. Divulg. Científica*, vol. 3, no. 1, pp. 27–31, 2017, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/324475378_EVALUACION_DE_PROPIEDADES_MECANICAS_Y_PERMEABILIDAD_AL_VAPOR_DE_AGUA_DE_PELICULAS_DE_QUITOSANO.
- [91] S. M. Pizarro, “Design of a Plant for Extraction and Purification of Pectin,” no. January, pp. 7–8, 2016.
- [92] J. M. Rossman, “Edible Films and Coatings for Food Applications,” *Edible Film*.

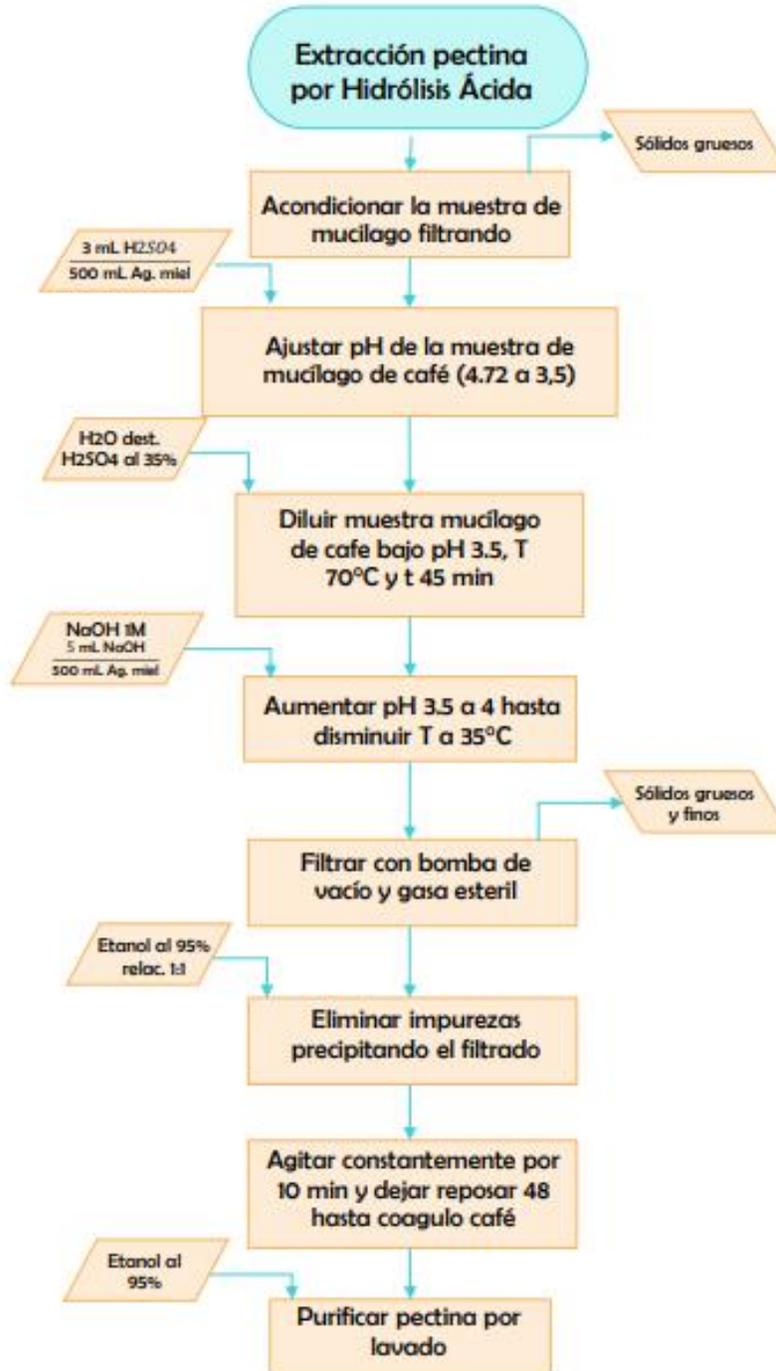
- Coatings Food Appl.*, pp. 367–390, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-92824-1.
- [93] L. S. F. Leite, C. M. Ferreira, A. C. Corrêa, F. K. V. Moreira, and L. H. C. Mattoso, “Scaled-up production of gelatin-cellulose nanocrystal bionanocomposite films by continuous casting,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 238, no. January, p. 116198, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116198.
- [94] D. R. Munhoz, F. K. V. Moreira, J. D. Bresolin, M. P. Bernardo, C. P. De Sousa, and L. H. C. Mattoso, “Sustainable Production and in vitro Biodegradability of Edible Films from Yellow Passion Fruit Coproducts via Continuous Casting,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 8, pp. 9883–9892, 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b01101.
- [95] “Art. 137. Limitación a la deducción por depreciación - Estatuto Tributario Nacional.” <https://estatuto.co/?e=1136> (accessed Mar. 28, 2021).

ANEXOS

ANEXO 1.

DIAGRAMAS

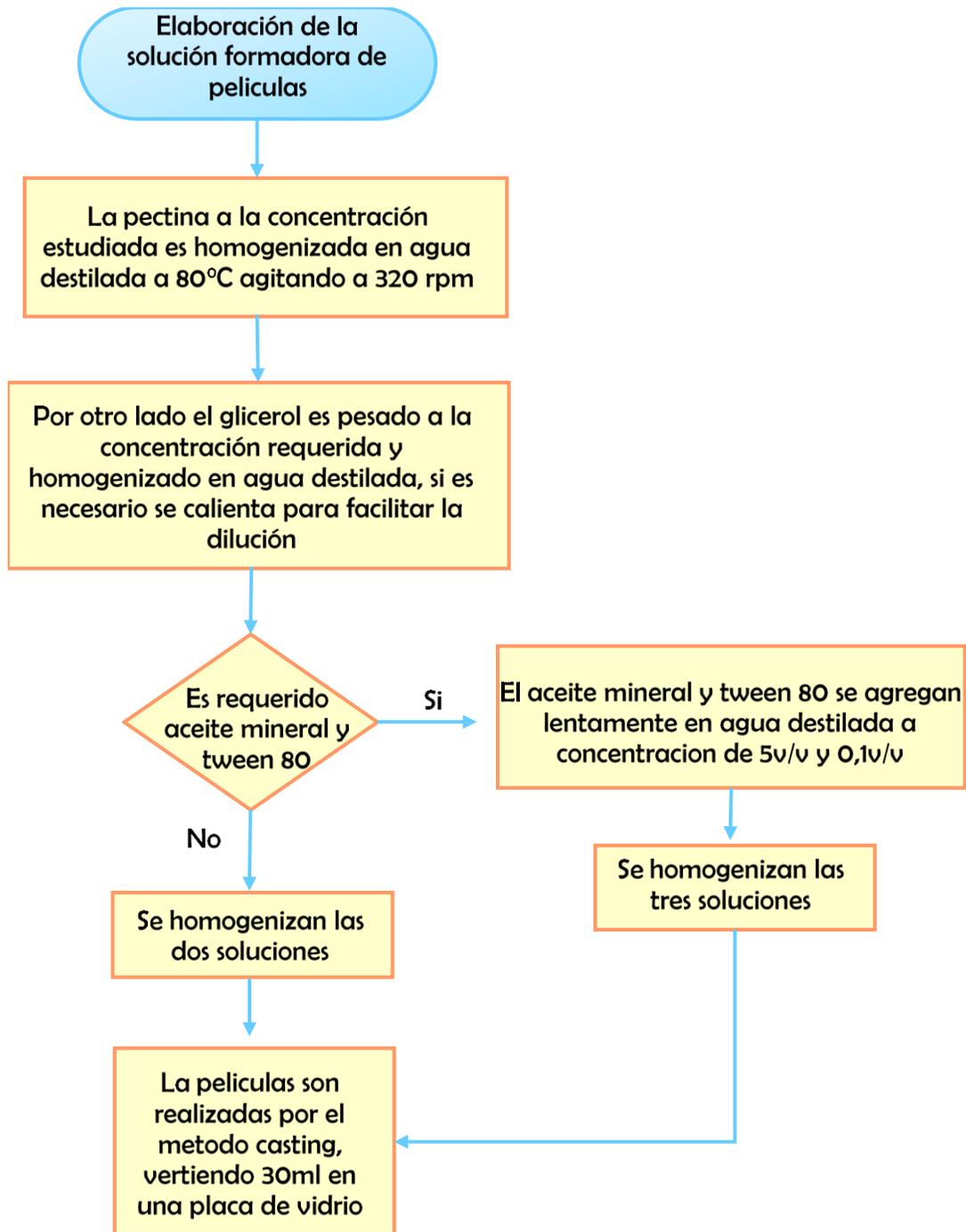
Figura 28.
Diagrama general del proceso de obtención de pectina.



Nota. La figura muestra el proceso llevado a cabo para extraer la pectina por el método de hidrólisis ácida.

Figura 29.

Diagrama general del proceso de elaboración de solución formadora de película.



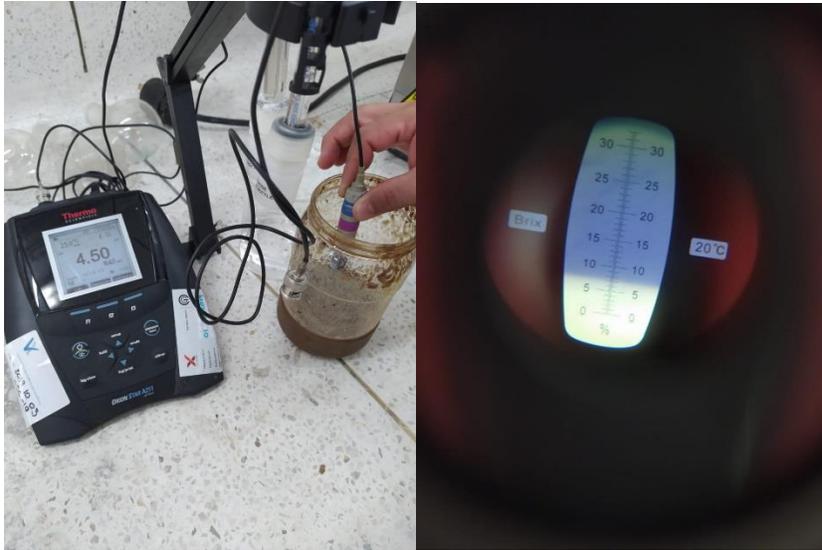
Nota. La figura muestra el proceso llevado a cabo para la elaboración de la solución formadora de película.

ANEXO 2. EQUIPOS

Figura 30.
Equipos y pruebas de laboratorio empleadas para caracterizar el mucílago

A) pH metro

B) Refractómetro



B) Termómetro



Nota. En la figura se observan los equipos empleados para la caracterización del mucílago de café a nivel laboratorio.

ANEXO 3.

CÁLCULOS

3.1. Cálculos para el rendimiento de pectina y caracterización de pectina

Rendimiento de pectina

$$\text{Rendimiento de pectina} = \frac{\text{g pectina}}{\text{litro agua miel}} * 100\%$$

Para obtener los gramos de pectina, primero se pesa un vaso de precipitados vacío, luego se pesa con la pectina

$$\text{Peso vacío} = 275.47\text{g}$$

$$\text{Peso con pectina} = 297.30\text{g}$$

$$\text{Rendimiento de pectina} = \frac{297.30 - 275.47\text{ g}}{1\text{ l}} * 100\% = 21.83\%$$

Peso equivalente y acidez libre de pectina

$$\text{Peso equivalente (Pe)} = \frac{\text{mg de componente ácido}}{\text{meq (A)NaOH}}$$

$$\text{Acidez libre (A)} = \frac{\text{meq (A) NaOH}}{\text{g de componente ácido}}$$

De acuerdo al viraje de la titulación se requirió 3ml de NaOH 0.1 N para una muestra de 0.508g de pectina de mucílago.

$$\text{Peso equivalente (Pe)} = \frac{508\text{mg}}{3\text{ml} * 0.1\text{N}} = 1693,33\text{ mg/meq}$$

$$\text{Acidez libre (A)} = \frac{3\text{ml} * 0.1\text{N}}{0.508\text{g}} = 0.59\text{ meq/g}$$

Porcentaje de metoxilo

$$\% \text{metoxilo} = \frac{\text{meq NaOH} * \text{PM metoxilo}}{\text{peso muestra (mg)}} * 100$$

Según la titulación realizada, el volumen necesario de NAOH 0.1N fue de 8ml, adicionalmente el peso molecular del metoxilo es 31g/mol.

$$\%metoxilo = \frac{8ml * 0.1 N * 31g/mol}{508 mg} * 100 = 4,88\%$$

Grado de esterificación

$$\%Grado\ esterificación\ (Ge) = \frac{meq\ NaOH\ (metóxilo)}{meq\ NaOH\ (acidez) + meq\ NaOH\ (metoxilo)} * 100$$

De acuerdo a la ecuación anterior, se obtiene el grado de esterificación dividiendo los miliequivalentes de hidróxido de sodio gastados en la determinación del contenido de metoxilo por la suma de los miliequivalentes de hidróxido de sodio gastados en la determinación de la acidez libre y los gastados en la determinación del contenido de metoxilo y multiplicando este valor por 100.

$$\begin{aligned} \%Grado\ esterificación\ (Ge) &= \frac{8ml * 0.1N\ (metoxilo)}{3ml * 0.1N(acidez) + 8ml * 0.1\ (metoxilo)} * 100 \\ &= 72.72\% \end{aligned}$$

3.2. Cálculos para cuantificar la permeabilidad al vapor de agua

$$WVT = \frac{G}{t * A} = \frac{(G/t)}{A}$$

$$Permeabilidad = \frac{WVT}{\Delta P} = \frac{WVT}{S (R1 - R2)} * e$$

Según las ecuaciones se calcula el WVT para las muestras de películas de pectina cítrica y de pectina cítrica-mucílago.

Películas de pectina cítrica

$$A = 0,00173 \text{ m}^2$$

$$WVT4 = \frac{0,0159 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 9,191 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

$$WVT5 = \frac{0,037 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 21,378 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

$$WVT6 = \frac{0,0172 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 9,942 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

Películas de pectina cítrica-mucílago

$$A = 0,00173 \text{ m}^2$$

$$WVT1 = \frac{0,0193 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 11,156 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

$$WVT2 = \frac{0,0226 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 13,063 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

$$WVT3 = \frac{0,0272 \text{ g/h}}{0,00173 \text{ m}^2} = 15,722 \frac{\text{g}}{\text{h} * \text{m}^2}$$

Luego, se estima la permeabilidad al vapor de agua para cada una de las muestras.

$$S = 3816 \text{ Pa}$$

$$R1 = 84\%$$

$$R2 = 0\%$$

$$e = 2,54 * 10^{-5} \text{ m}$$

Películas de pectina cítrica

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 4} &= \frac{9,191}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{9,191}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 2,023 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 5} &= \frac{21,387}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{21,387}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 4,708 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 6} &= \frac{9,942}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{9,942}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 2,188 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

Películas de pectina cítrica-mucílago

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 1} &= \frac{11,156}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{11,156}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 2,456 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

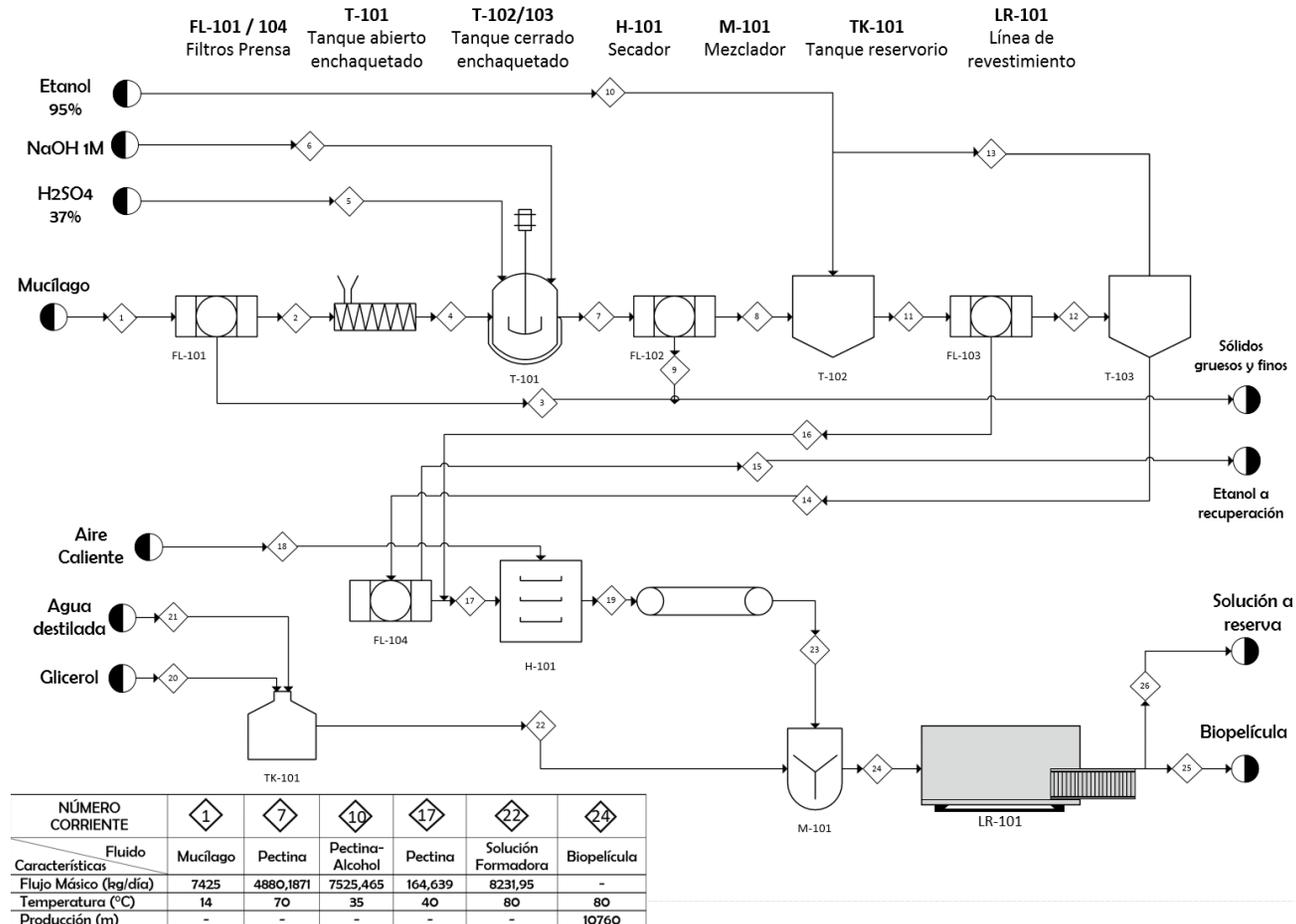
$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 2} &= \frac{13,063}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{13,063}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 2,875 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad 3} &= \frac{15,722}{3816 * (84\% - 0\%)} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= \frac{15,722}{3600} * 2,54 * 10^{-5} \\ &= 3,461 * 10^{-11} g * Pa^{-1} * s^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

ANEXO 4. DIAGRAMAS PFD

Figura 31.

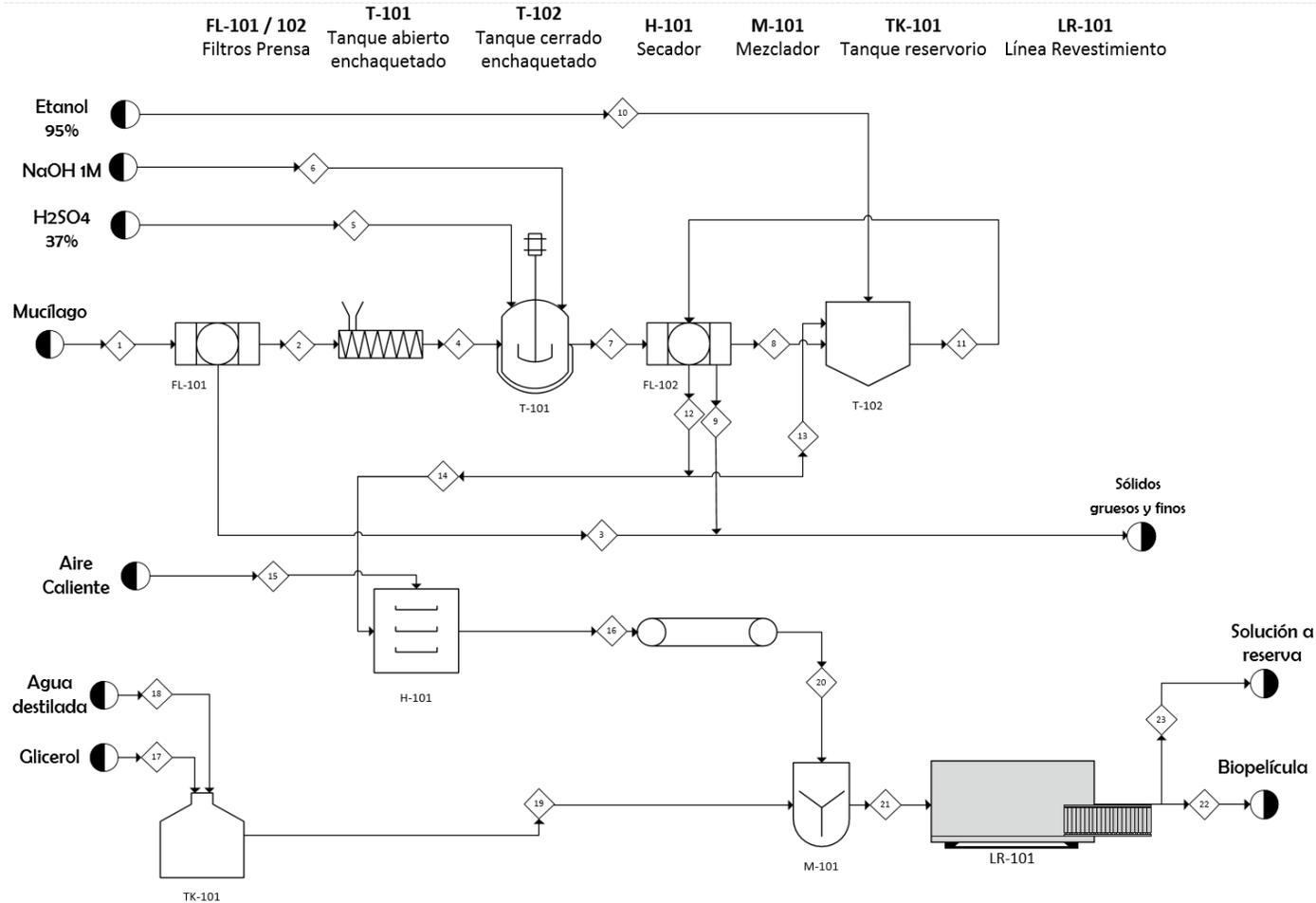
Diagrama PFD del proceso escalado de nivel laboratorio a nivel planta piloto.



Nota. En la figura se observan el diagrama PFD del proceso de producción de una biopelícula a nivel planta piloto.

Figura 32.

Diagrama PFD del proceso optimizado a nivel planta piloto.



Nota. En la figura se observan el diagrama PFD del proceso de producción optimizado de una biopelícula a nivel planta piloto.

ANEXO 5.

RECOMENDACIONES

En cuanto a la recolección y almacenamiento del mucílago de café, es recomendable para disminuir la multiplicación de los microorganismos mantener controlada la humedad, actividad de agua y temperatura, a su vez, realizar limpiezas periódicas en las instalaciones donde se obtiene el mucílago de café.

Es necesario evaluar la implementación de otros métodos de extracción para crear antecedentes específicamente para la pectina de mucílago de café, ya que se evidencia que la hidrólisis ácida, aun siendo un proceso sencillo, genera residuos difíciles de tratar que pueden producir un efecto no deseado en el ambiente, además de requerir el uso de solventes en gran cantidad. Adicionalmente, para la caracterización de pectina se recomienda utilizar metodologías con equipos más robustos que permitan establecer las características con mayor exactitud.

Con respecto a la evaluación de las propiedades de la película, se recomienda buscar y analizar otras propiedades que contribuyan con las diferentes aplicaciones del nuevo material, así mismo es necesario evaluar la propiedad de fuerza a la tensión para encontrar la resistencia de las películas. Adicionalmente, para la película de solo pectina de mucílago es necesario evaluar su elaboración mediante otros métodos de obtención de películas.

Se recomienda realizar el dimensionamiento de equipos principales de manera rigurosa, a su vez el dimensionamiento de bombas, tuberías y válvulas requeridas para así construir un diagrama P&ID y un posible Layout que permita visualizar la distribución en planta, con el fin de detallar un diseño de ingeniería. De igual forma, buscar nuevas optimizaciones del proceso partiendo del diagrama PFD del anexo 4.

Con el fin de lograr la viabilidad del proyecto, es necesario revisar costos de los equipos, precios de insumos, consumo energético por equipo y el porcentaje de valor agregado necesario para que el producto final tenga un margen positivo en la evaluación de los indicadores financieros, a su vez plantear escenarios para los cuales se verifica la tasa de rentabilidad mínima, el IPC, el DTF y la TRM en un tiempo específico.