

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño del proceso para la extracción de pectina a partir del tratamiento de
desechos provenientes de la industria agrícola

INGE-2693

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Sebastián Saúl Guerrero Arregui

Richard Alexis Moreno Almeida

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este logro a todos aquellos que sienten asombro por el poder transformador de la curiosidad. Explorar el mundo, en cualquiera de sus formas y ramas, es el motor que ilumina lo desconocido y nos impulsa a descubrir las maravillas que aún esperan ser reveladas.

Sebastián Saúl Guerrero Arregui

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos aquellos que puedan servirles en un futuro cercano. Que sea una inspiración a aquellos que busquen transformar cosas simples en grandes oportunidades.

Richard Alexis Moreno Almeida

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi madre, mi padre José y mi ñaña, así como al resto de mi familia y amigos. Su apoyo y compañía han sido la inspiración para afrontar los desafíos más exigentes, como la obtención de este título, con el anhelo de compartir con ustedes los frutos de este esfuerzo."

Sebastián Saúl Guerrero Arregui

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, quienes me apoyaron durante toda mi vida, así como a mi hermana. También quiero agradecer a mis amigos que me motivaron para seguir adelante y permitieron avanzar durante el transcurso de este proyecto. Así como a todos los docentes que nos brindaron su conocimiento y apoyo.

Richard Alexis Moreno Almeida

Declaración Expresa

Nosotros, Sebastián Saúl Guerrero Arregui y Richard Alexis Moreno Almeida acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de octubre del 2024.



Sebastián Saúl Guerrero
Arregui



Richard Alexis Moreno
Almeida

Evaluadores

MSc. Nadia Magaly Flores Manrique

Profesor de Materia

MSc. Lorena Jacqueline Quinchuela Carrera

Tutora de proyecto

Resumen

La pectina es ampliamente usada como agente gelificante en productos como jaleas, gelatinas, jugos y suplementos dietéticos dentro de industrias alimentarias y farmacéuticas. El proyecto presenta un proceso de extracción de pectina a partir de las cascaras de plátano y limón, aprovechando así los desechos agrícolas, dándoles un valor agregado y aprovechando materiales que normalmente serían descartados. El método empleado fue la hidrólisis ácida, utilizado para liberar y extraer la pectina contenida en la pared celular de las frutas, donde se usó ácido cítrico para este proyecto. De aquí se analizó el efecto de las materias primas a temperaturas de 70,80 y 90 °C, donde a mayor temperatura, se notó un incremento en el rendimiento y disminución en el CAG. Se obtuvieron rendimientos de 9.33% a 10.05% para el plátano, y de 20.88% y 32.43% para el limón. Esto indicó que el limón resulta más viable para productos industriales de alta calidad, mientras que, para el plátano, su pectina es más adecuada para aplicaciones como para la producción de biofilms. El análisis económico proyecta una inversión anual de \$60,000-\$70,000, con ganancias entre \$15,000-\$17,000. Este proceso promueve la valorización de los residuos agrícolas, reduciendo costos y la dependencia de importaciones.

Palabras Claves: Pectina, Ácido Galacturónico, Rendimiento, Hidrólisis ácida, Plátano.

Abstract

Pectin is widely used as a gelling agent in products such as jams, jellies, juices, and dietary supplements within the food and pharmaceutical industries. This project presents a process for extracting pectin from banana and lemon peels, thus adding value to agricultural waste and utilizing materials that would otherwise be discarded. The method employed was acid hydrolysis, used to release and extract pectin from the cell walls of fruits. Citric acid was utilized for this process. The effects of the raw materials were analyzed at temperatures of 70, 80, and 90 °C, where higher temperatures resulted in increased yields and reduced galacturonic acid content (CAG). Yields ranged from 9.33% to 10.05% for banana peels and from 20.88% to 32.43% for lemon peels, indicating that lemons provide higher pectin yields. This suggests that lemon pectin is more viable for high-quality industrial products, whereas banana pectin is more suitable for applications such as biofilm production. The economic analysis projected an annual investment of \$60,000 to \$70,000, with profits ranging between \$15,000 and \$17,000. This process promotes the valorization of agricultural waste, reducing costs and dependence on imports.

Keywords: Pectin, Galacturonic Acid, Yield, Acid Hydrolysis, Banana.

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Índice General	III
Simbología.....	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	VIII
Capítulo 1	1
1. Capítulo 1	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	3
1.3 Justificación del Problema.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 Marco teórico.....	6
Capítulo 2	11
2. Capítulo 2	12
2.1 Metodología.....	12
2.1.1 <i>Preparación de la biomasa</i>	12
Capítulo 3	23
3. Capítulo 3	24
3.1 Pretratamiento de las materias primas	24
3.1.1 Balance de Materia	24
3.1.3 Ensayos de Granulometría	25
3.2 Extracción de pectina mediante hidrólisis ácida.....	29

3.2.1 Resultados experimentales de la extracción de pectina.	29
3.2.2 Análisis de resultados por el método estadístico ANOVA	32
3.2.3 Análisis Experimental.	35
3.3 Diagrama de Bloques de Proceso.....	37
3.4 Análisis económico.....	38
3.4.1 Costos Fijos	38
3.4.2 Costos Variables y BEP.....	38
Capítulo 4	42
4. Capítulo 4	43
4.1 Conclusiones.....	43
4.2 Recomendaciones.....	44
5. Referencias.....	45

Simbología

CAG	Contenido de Ácido Galacturónico.
Kg	Kilogramo
g	gramos
h	horas
mol	moles
μm	micrómetro
pH	Potencial de Hidrogeno
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
kJ	Kilo Joules
L	Litros
ml	Mililitro
W	Watt
DE	Grado de Esterificación
Magua	Masa de agua removida (kg).
Cp	Calor específico del agua (4.18 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$).
ΔT	Incremento de temperatura ($T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}$).
Lv	Calor latente de vaporización (2260 kJ/kg).
KWh	Kilowatt por hora
Esecador	Energía de operación del secador. (kWh)
P_{secador}	Potencia del secador (W)
Toperación	Tiempo de operación del proceso (h)
Esecador plátano	Energía de operación para el secado de cáscara de plátano (kWh)
Esecador limón	Energía de operación para el secado de cáscara de limón. (kWh)
Etrituration	Energía de operación del molino. (kWh)

Ecalentador	Energía de operación para la hidrólisis ácida. (kWh)
Pcalentador	Potencia de la plancha de calentamiento (W)
Efiltrado	Energía de operación del filtrado (kWh)
Eincubadora	Energía de operación de la incubadora (kWh)
Pincubadora	Potencia de la incubadora (W)
Pbomba	Potencia de la bomba (W).
Pmolino	Potencia del molino (W).
Ettotal	Energía total del proceso
Ettotal plátano	Energía total del proceso a partir de cáscara de plátano
Ettotal limón	Energía total del proceso a partir de cáscara de limón
MeO	Contenido de Metoxilo.

Índice de Figuras

Figura 1.1 <i>Esquema representativo de la pectina</i>	1
Figura 2.1 <i>Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina por hidrólisis ácida</i>	12
Figura 3.1 <i>Distribución del tamaño de partículas para la cáscara de plátano</i>	28
Figura 3.2 <i>Distribución del tamaño de partículas a de limón</i>	28
Figura 3.3 <i>Gráfico de barras del rendimiento promedio de pectina</i>	30
Figura 3.4 <i>Gráfico de cajas y bigotes del rendimiento promedio</i>	30
Figura 3.5 <i>Gráfico de barras de CAG promedio de pectina</i>	31
Figura 3.6 <i>Gráfico de cajas y bigotes de CAG promedio de pectina</i>	31
Figura 3.7 <i>Gráfica de interacción para el rendimiento promedio</i>	32
Figura 3.8 <i>Gráfica de interacción para el CAG promedio</i>	33
Figura 3.9 <i>Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina de limón</i>	37
Figura 3.10 <i>Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina de plátano</i>	37

Índice de Tablas

Tabla 1.1 <i>Condiciones de operación del sistema de hidrólisis ácida de pectina</i>	8
Tabla 1.2 <i>Condiciones de operación del sistema de hidrólisis ácida de pectina</i>	9
Tabla 2.1 <i>Tipo de tamices utilizados para el ensayo granulométrico</i>	14
Tabla 2.2 <i>Condiciones de operación de la extracción ácida</i>	16
Tabla 2.3 <i>Cantidad de etanol usado en relación 1:2 por filtrado extraído</i>	18
Tabla 3.1 <i>Resultados del ensayo granulométrico promedio de la cáscara de plátano</i>	26
Tabla 3.2 <i>Resultados del ensayo granulométrico promedio de la cáscara de limón</i>	27
Tabla 3.3 <i>Resultados promedios de la hidrólisis ácida de cáscaras de plátano y limón</i>	29
Tabla 3.4 <i>Tabla de costos variables en reactivos</i>	39
Tabla 3.5 <i>Datos económicos anuales del diseño de extracción de pectina.</i>	41

Capítulo 1

1. Capítulo 1

1.1 Introducción

Ecuador es un país con una basta diversidad agraria, con una gran producción de insumos de cultivo, teniendo como ejemplo el plátano. Ecuador, es el mayor productor y exportador de este bien agrícola a nivel mundial. (Iriarte et al., 2014)

En el año 2019, la producción y exportación de banana en el Ecuador alcanzo a su punto más alto, siendo de 20 millones toneladas al año (Chamba et al., 2021), a diferencia del limón que sería 24.802 toneladas para el año 2020 (Flores et al., 2022).

Con respecto al plátano, su cáscara, siendo el residuo principal, es completamente desaprovechada, siendo descartado. No obstante, este material puede ser utilizado para la obtención de un producto con gran valor agregado, siendo una fuente de pectina. La pectina posee capacidad gelificante, la cual ha tenido una alta demanda en diferentes industrias como lo son la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética (Arshad et al., 2022).

De acuerdo con datos obtenidos de Expert Genius, una plataforma de inteligencia que proporciona información foránea sobre importación-exportación reciente y precisa, Ecuador obtiene pectina únicamente de exportaciones, de proveedores como Alemania, España, México, Dinamarca y Estados Unidos; dado a que no se cuenta con una industria de producción de pectina (Morley Gaibor, 2015). En lo que va del año, las cantidades de importación de pectina al país han sido de alrededor de 3000 kg al mes, siendo pedidos de empresas como Industrias Lácteas Toni, Resiquim, Alpina Productos Alimenticios Alpiecuador, Ecuajugos S.A, entre otras. (Genius, 2024)

Actualmente ha habido un incremento en el uso de productos naturales, dando así el interés y utilización de subproductos agrícolas, siendo el caso de la cáscara de plátano nacional, por su basta disponibilidad. Mediante el uso de procesos químicos para la extracción de pectina, donde predomina el método de hidrólisis ácida por su mayor

rendimiento y facilidad, usando condiciones de pH en un rango de 1.5 a 3.5 y temperaturas cercanas a los 70 °C. (Srivastava & Malviya, 2011)

1.2 Descripción del Problema

En la actualidad, la pectina es un insumo de nivel industrial que se caracteriza por su alta demanda en las industrias alimenticia, cosmética y farmacéutica, ya que posee propiedades importantes para el desarrollo de productos de consumo cotidiano. La pectina es un gelificante extraído a partir del tratamiento de la cáscara de varias frutas cítricas, como lo es el limón, uno de los recursos que cuenta con el mayor porcentaje de este material (Picot-Allain et al., 2022).

No obstante, la producción local de limón dentro del Ecuador no abastece la demanda de sus cáscaras que una industria productora de pectina necesitaría, ya que esto requiere del uso de importaciones de diferentes regiones como lo son las provenientes de Colombia y Perú para abastecernos del insumo. Empresas como Industrias Lácteas Toni S.A., Requisim S.A., Nutrifit S.A., entre otros se suministran de pectina principalmente de importaciones de países como Dinamarca, España, México y Brasil. Siendo cantidades entre 200 a 6000 kg (Genius, 2021). Esto se ha dado ya que en el país no se ha desarrollado ninguna metodología para extraer pectina, puesto que existe insuficiencia de la cáscara de limón, la cual es el recurso primario. Esto ha impulsado a la búsqueda de una nueva fuente de pectina en el Ecuador, para evitar abastecer su demanda a partir de importaciones únicamente.

Dentro de la industria agrícola, Ecuador ha producido aproximadamente 542,207 toneladas de plátano verde (musáceas) anualmente en el año 2022. Sin embargo, de todo el contenido de fruta, alrededor del 40 por ciento de esto corresponde a su cáscara, el cual es un material que simplemente se desecha. (Solano-Apuntes et al., 2022). Solamente una pequeña parte de estas cáscaras es convertida en abono, el cual en ciertas ocasiones termina

transformándose en un foco de infecciones, o simplemente se descarta sin ser utilizada en otra cadena de valor dentro del mercado. Este alto nivel de desperdicio representa una pérdida recuperable si se incorporan los subproductos agrícolas al sector industrial del país de manera más sostenible.

Con la falta de investigación y desarrollo de una metodología local para la hidrólisis de pectina a partir de las cáscaras de plátano, los costos de importación seguirán en aumento, y la falta de aprovechamiento de estos subproductos continuarían, sin dar uso a un valioso suministro, para las industrias que más la aprovechan.

1.3 Justificación del Problema

El proyecto surge como respuesta al problema de la gestión de residuos y desechos dentro del sector agrícola, dando así problemas en la gestión y contaminación ambiental. Entre los afectados están tanto las empresas que trabajan con desperdicios de plátano, como aquellas empresas agrícolas las cuales generan grandes cantidades de residuos y desechos (Guerrero & Muñoz, 2018). Por lo que la solución propuesta, siendo esta el diseño de extracción de pectina a partir de cáscaras de plátano permitiría beneficiar al sector agrícola, lo que promovería una economía circular para reducir estos restos y cerrar el ciclo de vida de los productos, generando beneficios económicos y ambientales.

Estudios similares se están llevando a cabo en áreas selectas a nivel mundial; por ejemplo, ciertos países como Estados Unidos, Alemania, México y China, con mejores prácticas agrícolas están investigando el uso de cáscaras de frutas extraídas de cítricos y plátanos para recuperar pectina. La pectina, una de las materias primas importantes en diversas aplicaciones industriales, se utiliza principalmente como agente gelificante en la industria alimentaria y farmacéutica (Ciriminna et al., 2022). Esto permite la oportunidad para que Ecuador pueda iniciar una planta de producción de pectina, ayudando así a transformar estos desechos en un recurso rentable, lo cual promoverá la economía circular.

Esto fomentaría a las industrias de reciclaje dentro del sector agrícola, lo que dará lugar a una reducción masiva de la degradación ambiental y brindando al país la oportunidad de explorar nuevas oportunidades económicas.

Se espera aprovechar el desperdicio de la cáscara del plátano y darle un valor agregado al ser usado dentro del mercado de extracción de pectina. Por lo que disminuiría la dependencia de importaciones de pectina abriendo paso a una economía circular. Permitiendo deshacerse de costos adicionales y no verse afectados frente a las fluctuaciones del mercado externo (Sarangi et al., 2023). Con el desarrollo de una metodología local para la hidrólisis de pectina a partir de las cáscaras de plátano, no solo se disminuiría los costos de importación, sino también la generación de nuevas fuentes de ingresos y promover un mejor uso de estos recursos agrícolas. Esto transformaría un subproducto actualmente desperdiciado en un valioso suministro para las industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar un proceso de extracción de pectina a partir del uso de desechos agrícolas del plátano y el limón para la obtención de un producto que cumpla con las normas correspondientes a la Codex General Standard for Food Additives.

1.4.2 Objetivos específicos

- Extraer la pectina de la cáscara de limón y plátanos mediante el método de hidrólisis ácida.
- Identificar el mejor extracto y sus condiciones de obtención mediante el diseño experimental factorial por análisis ANOVA.
- Estimar viabilidad económica del proceso de extracción de pectina diseñado.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Hidrocoloides

El término hidrocoloide es una palabra compuesta entre coloide e hidrofílico, entendiéndose que, los coloides son mezclas homogéneas en donde las sustancias están suspendidas una en otra. Los hidrocoloides, son polímeros de cadenas largas que poseen una cantidad considerable de grupos hidroxilos (OH), lo cual les da la habilidad de interactuar fuertemente con los enlaces de hidrógeno del agua. Estos materiales se los usa como agentes gelificantes, emulsificadores y espesantes. Comúnmente, los hidrocoloides más utilizados para la industria alimenticia son los polisacáridos, como: almidón, celulosa modificada, goma y pectina (Zeece, 2020)

Para el caso de este estudio, el enfoque es directamente en la pectina. La pectina es un heteropolisacárido no tóxico que posee gran valor para las industrias no solo de la alimenticia, sino también, en la farmacéutica y cosmética ((Khamsucharit et al., 2018). Se la encuentra en las paredes celulares de plantas no madereras, en especial en sus frutos. Muchos de estos frutos usados para extraer pectina, son, por ejemplo: limón, naranjas, manzanas y demás frutos cítricos. Pero también se han empezado casos de estudio donde se investiga la efectividad de otras fuentes como lo puede ser la banana (Obele et al., 2019)

Como se puede observar en la figura 1.1, esta fibra estructural está compuesta en su mayoría por bloques de polisacáridos enriquecidos de ácido galacturónico como lo son el homogalacturonan, el rhammagalacturonan y el xylogalacturonan. Al poseer regiones polares y no polares, la pectina es un producto muy versátil que puede ser incorporado en cualquier sistema. Y permite desarrollar de mejor forma cualidades de productos como las propiedades sensoriales de comidas, ejemplificando su alza en su demanda e importancia para varios sectores industriales (Roman-Benn et al., 2023).

moléculas de pectina, y separar al compuesto de la materia vegetal (Almeida et al., 2019). Hay una gama muy abierta para el tipo de ácido que se escoge para esta parte del proceso. Varía desde ácidos fuertes como lo son: ácido clorhídrico, nítrico y sulfúrico; y de ácidos débiles como lo es el ácido cítrico (Jong et al., 2023). De este catálogo de ácidos, uno de los más efectivos o sino el más efectivo es el ácido cítrico (Rungraeng & Kraithong, 2020). La importancia de esta sustancia no solo es la capacidad de romper la pared celular, sino de ligarse y aislar la pectina (Nadar et al., 2022). Por ende, en este estudio se usará el ácido cítrico. Las condiciones óptimas para la hidrólisis ácida están tabuladas en la tabla 1.1.

Tabla 1.1

Condiciones de operación del sistema de hidrólisis ácida de pectina (Pereira et al., 2016)

Parámetros	Datos
pH	1.5-3.5
Temperatura de Extracción (°C)	70-90
Tiempo de Extracción (h)	2-3
% de Etanol para precipitación	60
Costo de Producción	Bajo
Ciclo de Vida útil	Alto

Una vez se obtiene el subproducto del paso anterior, se procede con el método de filtración y precipitación de la pectina. Para esto se necesita de una membrana semipermeable para el secado del derivado y así poder segmentar la pectina de posibles residuos no deseados. La masa derivada, es colocada en un contenedor y se la llena de una sustancia que logre precipitar la pectina. En este paso, se utiliza un alcohol como precipitante, teniendo como opción tanto el etanol como el isopropanol (Srivastava & Malviya, 2011). Ambos son efectivos para su

propósito, pero el etanol por tema de costos es el compuesto a usar (Harryman, 2024). Cuando se cumple el tiempo se vuelve a filtrar para separar la pectina y secarla.

Para caracterizar la pectina hay dos métodos importantes, puesto que no solo identifican la presencia del compuesto en la muestra analizada, sino que también señalan la calidad de esta (Mollea et al., 2008). El primer método que se utiliza es para la obtención del CAG, siendo el método Ranganna. (Ranganna, 1995).

El segundo método es la obtención del grado de esterificación. Se utiliza nuevamente la misma muestra que se trabajó en el ensayo de CAG mediante el método Ranganna. (Ranganna, 1995). La tabla 1.2 indica las propiedades fisicoquímicas favorables en la caracterización de la pectina.

Tabla 1.2

Propiedades fisicoquímicas de la pectina (Cui et al., 2023)

Parámetros	Datos
Peso molar [g/mol]	60-300
Ácido Galacturónico	>65 %
Alto metoxilo	>50 % DE
Bajo metoxilo	<50% DE

1.5.3 Análisis Económico.

En el marco de proyectos de aprovechamiento de residuos agroindustriales, es fundamental la realización de un análisis económico que permita evaluar la viabilidad financiera y competitividad de la producción de pectina a partir de cáscaras de plátano. Tradicionalmente, la pectina se extrae de cáscaras de cítricos, materia prima cuyo acceso es limitado por su falta de producción local (Primicias, 2023). Para este proyecto, el método de comparación de proporciones constituye una herramienta analítica esencial, ya que permite comparar de manera

precisa las relaciones entre los costos, el rendimiento y los beneficios de diferentes las fuentes de pectina (Huang & Shen, 2003). Esto facilita la identificación de ventajas económicas del proceso de extracción a partir de cáscaras de plátano, un recurso subutilizado en Ecuador.

El método de comparación de proporciones analiza variables clave, como el costo de la materia prima, el rendimiento de extracción, el precio de mercado de la pectina y los costos operativos del proceso. En el caso de las cáscaras de plátano, se espera un costo bajo en la materia prima debido a su naturaleza de subproducto y su abundante disponibilidad (Chamba et al., 2021). Este aspecto confiere una ventaja inicial sobre las cáscaras de cítricos, que a menudo tienen un precio más alto por sus usos en otros productos industriales (Ashok et al., 2017). Sin embargo, uno de los principales desafíos es el rendimiento de la extracción de pectina, que afecta directamente la viabilidad del proceso. Una extracción de bajo rendimiento implicaría mayores costos de procesamiento para obtener cantidades comercialmente viables de pectina.

Este análisis económico, al comparar las proporciones de costos de producción y rendimiento, permite establecer si la pectina de cáscara de plátano puede ser competitiva frente a las opciones comerciales de origen cítrico. Además, la evaluación de la rentabilidad proyectada es esencial, considerando el crecimiento en la demanda de ingredientes naturales en las industrias alimentaria y cosmética (Pan et al., 2013). En conjunto, el método de comparación de proporciones permite determinar la factibilidad económica del proyecto e identificar su sostenibilidad financiera, con un enfoque de economía circular.

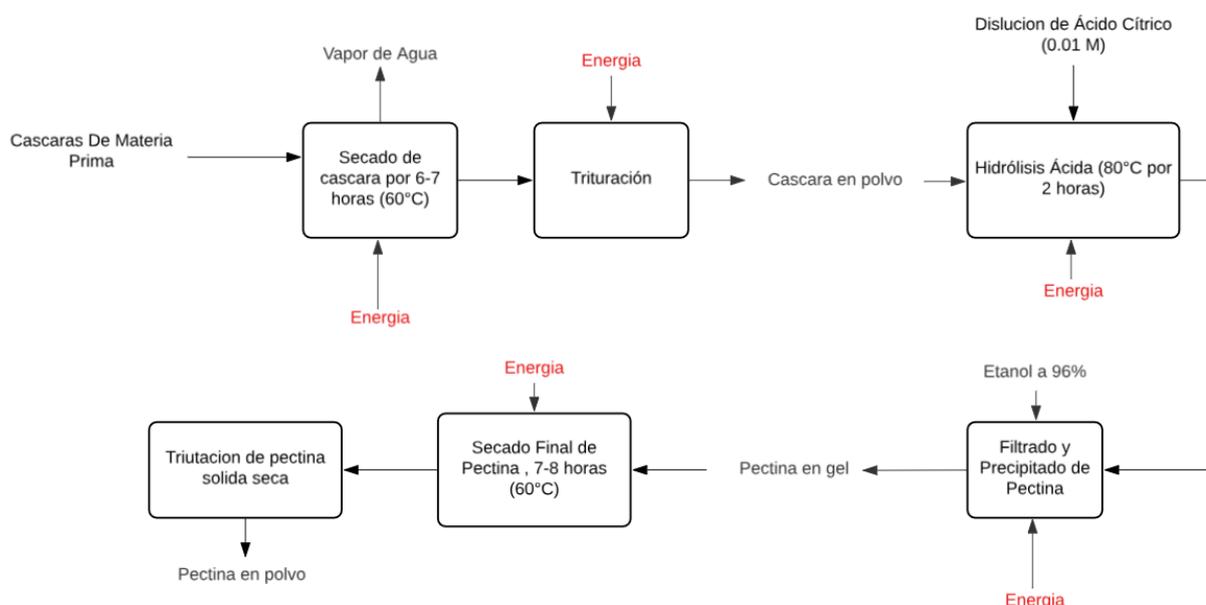
Capítulo 2

2. Capítulo 2

2.1 Metodología

Figura 2.1

Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina por hidrólisis ácida.



2.1.1 Preparación de la biomasa

En este proyecto, para la obtención de la materia prima, las cáscaras de plátano fueron obtenidas desde la hacienda San José en la provincia de Los Ríos. Se especificó que la entrega de un racimo entero de plátano debía ser de un fruto tierno para la experimentación, puesto que el plátano tierno o inmaduro es teóricamente más rico en pectina (Kamble et al., 2017). Mientras que las cáscaras de limón fueron obtenidas desde mercados locales como la Vienesá, Mi Comisariato y Megamaxi. La obtención de muestra de cáscara de limón (Haití) se lo hizo en variados puntos, para obtener una muestra representativa de la fruta, donde estas cáscaras de limón y plátano se lavaron cuidadosamente con el fin de eliminar impurezas. El tipo de impurezas que se eliminaron de las muestras de los frutos van desde partículas de suciedades varias como residuos de polvos y material orgánico residual, hasta residuos de pesticidas que

puedan afectar la calidad de la pectina obtenida (Yusufu et al., 2014). De esta manera, se aseguró que la calidad de la materia prima no iba a afectar en el proceso de extracción del producto final.

Para tener una referencia de la masa necesaria en base seca, y la humedad que se necesitó eliminar para las muestras de plátano y limón, se hizo uso de la termobalanza que se encuentra en Soberanía para sacar la humedad aproximada que se tendrá que remover, siendo de 65% de humedad para el plátano y de 75% de humedad para limón (Ngoko Tchamba et al., 2024).

Luego, las cáscaras limpias se sometieron a un proceso de secado en bandejas. Este proceso se trabajó colocando las cáscaras en 5 bandejas perforada dentro del secador, a 60°C manteniendo una temperatura constante con un flujo de aire directo. Se continuó hasta obtener una masa constante, siendo por 7 horas para las cáscaras de plátano, y 5 horas para las cáscaras de limón, habiendo eliminado el contenido de agua de las cáscaras. Esto se realiza para poder prevenir la degradación de los compuestos bioactivos y facilitando la manipulación y almacenamiento de las cáscaras antes del proceso de extracción (Bee Lin & Yek Cze, 2018).

Posteriormente, se lleva a cabo la etapa trituración y pulverización de las cáscaras secas. Esto consistió en reducir el tamaño de las partículas de las cáscaras, obteniendo un menor tamaño de partícula, incrementando la superficie de contacto y así facilitando la liberación de la pectina durante la hidrólisis ácida (Iñiguez-Moreno et al., 2024). En esta etapa, se emplea un molino de grano de marca Corona para transformar las cáscaras en un polvo fino, lo que permite una mayor eficiencia en el proceso de extracción debido a la mejor exposición de los componentes celulares (Tsouko et al., 2020) . Por último, se procedió por un proceso de tamizado para poder obtener una harina de las cáscaras con un tamaño apropiado de partículas finas, siendo pasadas por un colador (Yusufu et al., 2014). Todo esto se lo almacenó en fundas ziploc que posteriormente se les eliminó todo el aire posible de su interior y se las depositó en un desecador para almacenar las muestras hasta empezar con la siguiente parte del proceso, la hidrólisis ácida.

2.1.2 Ensayo Granulométrico

Para este proceso, se utilizó un juego de tamices compuestos desde el número 8 hasta el 200, siendo de un tamaño de partículas entre 2360 μm hasta 75 μm . Esto se realizó para poder medir el tamaño promedio de las partículas del polvo de cáscara del limón y el plátano usado para el proceso de extracción de pectina. A su vez nos permitió ver que tan homogéneo fue el polvo obtenido por la trituración de las cáscaras en el molino.

Para este ensayo se realizó el uso de los tamices indicados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1

Tipo de tamices utilizados para el ensayo granulométrico.

Número de Tamiz	Tamaño de Partícula
#8	2.36 mm
#10	2.00 mm
#40	425 μm
#45	355 μm
#50	300 μm
#70	212 μm
#100	150 μm
#140	106 μm

Donde se procedió a utilizar las muestras de polvo de cáscaras de plátano y de limón. De los resultados obtenidos se sacó un promedio para la obtención del valor D80, un número representativo que nos indica el tamaño del cual el 80% de la muestra es pasante (Roa et al., 2019).

2.1.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental factorial 2x3 y se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA). El enfoque dado por esta metodología permitirá ver los efectos individuales y combinados de las variables manipuladas escogidas, sobre las variables observables (F. Wang et al., 2020).

Las variables manipuladas fueron el tipo de materia prima, y la temperatura de operación para la extracción de hidrólisis ácida. Debido a que el cliente aseguró la necesidad de buscar materias primas alternativas y a su vez, poder escoger las condiciones de operación propicias para el proceso. Siendo las materias primas seleccionadas la cáscara de plátano de la especie *Musáceas*, y la cáscara de limón de la especie *Tahití*, ya por su alta disponibilidad en Ecuador, siendo los subproductos agrícolas que generan grandes volúmenes de cáscaras como desecho tanto en procesos industriales como locales (Solano-Apunte et al., 2022). Las temperaturas seleccionadas fueron 70, 80 y 90 °C. Esto se decidió basándose en investigaciones previas donde indican estas temperaturas como las más adecuadas para la ruptura de las paredes celulares y la liberación de pectina. (Pereira et al., 2016). Además, el trabajar en este rango permitió evitar la degradación térmica de los compuestos sensibles, como el ácido galacturónico y así la obtención de un producto de calidad (Oliveira et al., 2016).

Por lo que, el diseño factorial nos indica que la cantidad de ensayos son 2 x 3, al ser dos materias primas para tres diferentes de temperatura. Además, se realizaron tres replicas por combinación para aumentar la confiabilidad de los datos. Esto se proporciona en la tabla 2.2:

Tabla 2.2

Condiciones de operación de la extracción ácida. (Happi Emaga et al., 2008)

Materia prima	pH	Temperatura	# De Muestras
Por Ensayo			
Plátano	2	70	3
Plátano	2	80	3
Plátano	2	90	3
Limón	2	70	3
Limón	2	80	3
Limón	2	90	3

Una vez realizado los ensayos de extracción, se procedió al cálculo de las variables observables más importantes para el objeto del documento, los cuales fueron el rendimiento de extracción y la cantidad de ácido galacturónico, para cada combinación de materia prima y temperatura expuesta. Con esto, se procedió al análisis estadístico.

El análisis estadístico se lo realizó por medio del método ANOVA factorial, y se logró calcular los efectos principales de cómo influye de manera individual la materia prima escogida y también los efectos de la variación de la temperatura para los ensayos. Así como también la interacción entre las dos variables manipuladas y ver los efectos en las variables de respuesta obtenidas, siendo estos las interpretaciones principales (Landsheer & Van Wittenboer, 2015).

Para efectos de la obtención de resultados que den un análisis certero, se procedió a realizar el ANOVA factorial por medio de un código en la herramienta Python con lo que se obtuvo gráficos de interacción, los cuales analizan los efectos individuales, y curvas de respuesta, que identificó el efecto de la temperatura sobre la materia prima, para este caso

(Unpingco, 2022). Las hipótesis nulas usadas para el análisis estadístico son las presentadas a continuación:

1. No hay variabilidad en el rendimiento por efecto de la temperatura entre las materias primas analizadas.
2. No hay variabilidad en el CAG por efecto de la temperatura entre las materias primas analizadas.
3. No hay variabilidad notable en los resultados de las muestras entre las materias primas analizadas.

2.1.4 Extracción de Pectina

De acuerdo con las metodologías revisadas para la extracción de pectina a escala laboratorio, la forma convencional para extraer pectina a partir de cáscaras de materia vegetal como lo es la cáscara de plátano, es mediante la hidrólisis ácida (Ranganna, 1986). Durante la hidrólisis, la solución ácida se encarga de romper los enlaces químicos que posee una molécula conocida como “proto pectina” con moléculas más grandes presentes en la pared celular de la cáscara como lo son la celulosa y hemicelulosa (Ganjoo et al., 2023) Al ser la pectina un polímero de ácido galacturónico, la pectina se esterifica con metanol en la pared celular, lo cual la vuelve insoluble en agua (Tsuru et al., 2021) Para esto, el pH ácido, logra hidrogenar los bloques de pectina y transformarla de proto pectina, insoluble en agua, en pectina, soluble en agua (Müller-Maatsch et al., 2014).

Por todas las razones expuestas previamente, las condiciones de experimentación usadas fueron: pH de 2 y una temperatura de 70 a 90 °C para mantener el proceso dentro de 2 horas (Sayah et al., 2016). Aparte, el ácido escogido fue el ácido cítrico, precisamente porque este ácido actúa como un quelante además de su función principal. Los citratos formados en la

solución acuosa precipitan iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , para evitar su interferencia en el proceso (Oliveira et al., 2016).

Para empezar con el proceso a escala laboratorio, primero se tomó la cáscara seca previamente almacenada en los desecadores del laboratorio de usos generales, y se procedió al pesado de muestras de 20 gramos cada una, en matraces de 250 ml. Una vez ingresado el polvo vegetal en el matraz, se añadieron 500 ml de solución ácida pH 2 de agua destilada con ácido cítrico, y se procedió a diluir la muestra con agitación manual hasta ver un producto homogéneo. De aquí las muestras de mezcla homogéneas se colocan encima de placas de agitación y calentamiento del laboratorio de Usos Generales, y se dejan en mezclado constante por dos horas a la temperatura de operación escogidas.

Luego se dejó enfriar cada una de las muestras por ensayo y se procedió a filtrar con una malla de emulsiones de forma manual de $0.75 \mu\text{m}$. El filtrado obtenido se lo almacenó en un vaso de precipitación de 1 L y se procedió añadir un volumen de etanol de 96% de pureza con relación 1:2 con respecto al volumen total recogido por muestra ejemplificado en la tabla 2.3 mostrada a continuación:

Tabla 2.3

Cantidad de etanol usado en relación 1:2 por filtrado extraído. (Nadar et al., 2022)

Cantidad De Filtrado Extraído	Cantidad De Etanol 96% Usado
125-175 ml	250- 350 ml

Una vez mezclado el nuevo producto con el etanol, se deja reposar la muestra por 30 minutos y se filtra con una bomba al vacío marca Gast para así obtener la pectina en base gel. En el filtrado a vacío se realizaba un cambio de filtro una vez por muestra, logrando que el filtrado sea más efectivo y rápido. La pectina de gel se procedió a secar por un periodo de 8-9 horas en

una incubadora del laboratorio de Servicios Generales a 60 °C. La pectina seca y solida se macillo en un mortero para obtenerla en forma de polvo.

El rendimiento de la pectina fue calculado usando la ecuación 2.1

$$\text{Rendimiento} = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (2.1)$$

Donde

A= Pectina seca extraída en gramos

B= Polvo de cáscara seca inicial en gramos

2.1.5 Caracterización

2.1.5.1 Peso Equivalente

El peso equivalente es una especificación fundamental en la caracterización de la pectina, porque no solo proporciona un indicativo de ácido galacturónico, sino que a su vez indica información acerca de la estructura y pureza de la pectina (Mollea et al., 2008). Este parámetro considera las fragmentaciones que pudo sufrir la pectina al terminar las etapas de extracción, ya que, a menor porcentaje de ruptura de la cadena, mejor gelificante es la pectina obtenida (Gawkowska et al., 2018).

El primer método que se utiliza es el peso molecular de la pectina obtenida mediante el método de Ranganna (Ranganna, 1986). Este método inicia con la medición de aproximadamente 0.5 gramos de la pectina seca obtenida, el cual es colocada en el matraz de 250 ml, donde se coloca 5 ml de etanol al 96% junto a 1 gramos de cloruro de sodio y 100 ml de agua destilada. Se procede a añadir el indicador de fenol rojo y a titular junto con la solución de 0.1 N de NaOH. El punto final de la titulación se lo vio por el cambio de color purpura. La solución neutralizada es almacenada para la determinación del contenido de metoxilo y el CAG.

El peso equivalente de la pectina fue calculado usando la ecuación 2.2

$$\text{Peso Equivalente} = \frac{\text{Peso de la muestra} \times 1000}{\text{ml de titulante usado} \times \text{Normalidad del titulante}} \quad (2.2)$$

2.1.5.2 Contenido de Metoxilo (MeO)

La determinación del MeO es dado por el método de Ranganna (Ranganna, 1986). El contenido de metoxilos en una muestra de pectina es de suma importancia porque es un indicador de la funcionalidad de esta. Con un grado alto de MeO sobrepasando 50%, la pectina se gelifica por los grupos carboxilos esterificados en presencia de azúcares y pH bajos. Por otro lado, al poseer una menor concentración al 50%, se gelifica con iones divalentes como lo son los iones de calcio (Kute et al., 2019).

En este método se realiza una titulación con hidróxido de sodio al 0.1 M a una solución de la muestra neutralizada en la prueba de peso equivalente. Se le añaden 25 ml de solución de NaOH a 0.25N y mezcla detenidamente. Después de reposar la solución por un tiempo aproximado de 30 minutos, se le introducen 25 ml de ácido clorhídrico a 0.25N. Esto se realiza para poder permitir que el ácido descomponga la pectina y libere el ácido galacturónico. Como siguiente paso se realiza una última titulación nuevamente con el hidróxido de sodio de 0.1N y este dato se introduce en la fórmula para poder identificar a la pectina como de alta o baja calidad (Khamsucharit et al., 2018).

La fórmula para calcular el contenido de metoxilo es dada por la ecuación 2.3

$$MeO = \frac{ml \text{ de titulante} \times Normalidad \text{ del titulante} \times 3.1}{Peso \text{ de la muestra}} \quad (2.3)$$

2.1.5.3 Porcentaje del CAG

La estimación del CAG es importante para poder determinar la pureza y el grado de esterificación, dándonos así una evaluación de las propiedades físicas de la pectina extraída (Jong et al., 2023b). El CAG mínimo necesario para tener una pectina comercializable debe ser de un porcentaje mayor al 65% (Lai et al., 2022). Esto indicaría que tiene una buena capacidad gelificante necesaria para su función dentro de las industrias de alimentos, cosmetología y farmacéutica (Ciriminna et al., 2016).

La pectina, la cual es un poli galacturónico esterificado parcialmente, la cual contiene alrededor de un 10% de material orgánico, compuesto por azúcares, arabinosa y galactosa (Kute et al., 2019).

Se puede obtener el contenido porcentual de ácido galacturónico mediante la fórmula 2.4.

$$AG \% = \frac{176 \times 0.1z + 100}{W \times 1000} + \frac{176 \times 0.1y + 100}{W \times 1000} \quad (2.4)$$

Donde

Z= ml de titulación de NaOH del método de peso equivalente

Y= ml de titulación de NaOH del método de contenido de Metoxilo.

W= Peso de la muestra.

2.1.5.4 Grado de esterificación (DE)

El DE se lo puede obtener mediante el uso de los datos obtenidos en las pruebas del contenido de metoxilo y del contenido de CAG (Kute et al., 2019).

Se lo calcula mediante la fórmula 2.5

$$DE\% = \frac{176 \times \%MeO}{31 \times \%AG} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.1.6 Análisis Económico.

Los datos obtenidos a partir de los diferentes métodos de extracción fueron analizados, y se seleccionaron aquellos que presenten los mayores porcentajes de rendimiento junto con las condiciones específicas en las que se lograron.

2.1.6.1 Costo de Producción Total

Para el costo de producción total (CPT), se lo obtiene por la adición de los costos fijos y de variables. Entre los costos fijos tenemos el costo del material de laboratorio necesario para la extracción y su caracterización. (de Freitas et al., 2021)

Entre los costos de variables, los cuales están directamente relacionadas con la capacidad de producción, el costo de la materia prima, el combustible, y costos energéticos.

2.1.6.2 Ganancia y Punto de Equilibrio

Para el cálculo de la ganancia, se obtuvo por la multiplicación del precio de la pectina con respecto a la cantidad total producida, donde se considera que hubo una venta del 100 % del producto (de Freitas et al., 2021).

Desde la obtención de este valor, el punto de equilibrio es calculado mediante la ecuación 2.6, para la determinación del valor mínimo necesario de la capacidad operacional para poder obtener ingresos (de Freitas et al., 2021).

$$BEP = \frac{CF}{G-CV} \quad (2.6)$$

Donde:

CF= Costos fijos

G= Ganancias de ventas

CV= Costos de variables

Capítulo 3

3. Capítulo 3

3.1 Pretratamiento de las materias primas

3.1.1 Balance de Materia

Cálculo de masa seca

La masa seca se obtiene a partir de la siguiente ecuación 3.1:

$$\text{Masa seca} = \text{Masa inicial} \times (1 - \text{Humedad inicial}) \quad (3.1)$$

$$\text{Masa seca de platano} = 1 \text{ Kg} \times (1 - 0.65) = 0.35 \text{ kg}$$

$$\text{Masa seca de platano} = 1 \text{ Kg} \times (1 - 0.75) = 0.25 \text{ kg}$$

Cálculo de agua removida

El agua removida durante el secado se calcula mediante la siguiente ecuación 3.2:

$$\text{Agua removida} = \text{Masa inicial} \times \text{Humedad inicial} - \text{Masa seca} \times \text{Humedad final} \quad (3.2)$$

$$\text{Agua removida de platano} = 1 \text{ kg} \times 0.65 - 0.35 \times 0.04 = 0.636 \text{ kg de } H_2O$$

$$\text{Agua removida de limon} = 1 \text{ kg} \times 0.75 - 0.25 \times 0.06 = 0.735 \text{ kg de } H_2O$$

3.1.2 Balance de Energía

Energía para secado de cáscaras

Se calcula la energía usada por el secador de bandejas mediante la ecuación 3.3:

$$E_{\text{secador}} = P_{\text{secador}} * t_{\text{operación}} \quad (3.3)$$

$$E_{\text{secador Plátano}} = \frac{180763.71 \text{ W}}{1000} * 5.5h = 994.2 \text{ kW h}$$

$$E_{\text{secador Limón}} = \frac{180763.71}{1000} \text{ W} * 7.5h = 1355.728 \text{ kW h}$$

Energía para trituración de cáscaras secas.

Se calcula la energía usada por el secador de bandejas mediante la ecuación:

$$E_{\text{trituración}} = P_{\text{Molino}} * t_{\text{operación}} \quad (3.4)$$

$$E_{\text{trituración}} = 0.26 \text{ kW} * 0.25h = 0.065 \text{ kW h}$$

Energía para calentamiento de solución (hidrólisis ácida)

La energía requerida para el proceso de hidrólisis ácida se calcula mediante la fórmula 3.5:

$$E_{calentador} = P_{calentador} * t_{operación} \quad (3.5)$$

$$E_{calentador} = \frac{120}{1000} W * 2 \text{ horas} = 0.240 \text{ kWh}$$

Energía para la filtración del producto

La energía requerida de la filtración a vacío se calcula mediante la ecuación 3.6:

$$E_{filtrado} = \frac{100}{1000} W \cdot 0.25 \text{ h} = 0.025 \text{ kWh} \quad (3.6)$$

Energía para secado de pectina húmeda

Se calcula la energía usada de la incubadora mediante la ecuación 3.7:

$$E_{incubadora} = P_{incubadora} * t_{operación} \quad (3.7)$$

$$E_{incubadora} = \frac{100}{1000} W * 8 \text{ h} = 0.8 \text{ kWh}$$

Energía total del proceso

La energía total se obtiene mediante la ecuación 3.8:

$$E_{total} = E_{secador} + E_{trituration} + E_{hidrolisis} + E_{filtrado} + E_{incubadora} \quad (3.8)$$

$$E_{total} \text{ plátano} = 994.2 \text{ kW h} + 0.065 \text{ kWh} + 0.24 \text{ kWh} + 0.025 \text{ kWh} + 0.8 \text{ kWh}$$

$$= 995.3 \text{ kWh}$$

$$E_{total} \text{ limón} = 1355.728 \text{ kW h} + 0.065 \text{ kWh} + 0.24 \text{ kWh} + 0.025 \text{ Wh} + 0.8 \text{ Wh}$$

$$= 1356.8 \text{ kWh}$$

3.1.3 Ensayos de Granulometría

Los resultados permitieron obtener un valor promedio del tamaño del polvo de las cáscaras de plátano utilizadas durante el proceso de hidrólisis ácida (Lacivita et al., 2023). A su vez para identificar la homogeneidad de las muestras después de haber pasado por el molino Break Mill marca Brabender.

Tabla 3.1*Resultados obtenidos del ensayo granulométrico promedio de la cáscara de plátano***Ensayo Granulométrico por Tamizado**

Tamaño máximo		Peso Seco: 35.5 g			
Abertura Tamiz					
N° Tamiz	Tamaño partícula [µm]	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje Pasante
8	2360	0.47	1.32956	1.32956	98.67044
10	2000	0.21	0.59406	1.92362	98.07638
40	425	15.67	44.32815	46.25177	53.74823
45	355	3.17	8.96747	55.21924	44.78076
50	300	3.25	9.19378	64.41301	35.58699
70	212	4.09	11.57001	75.98303	24.01697
100	150	2.64	7.46818	83.45120	16.54880
140	106	2.74	7.75106	91.20226	8.79774
200	75	1.87	5.28996	96.49222	3.50778
Fondo		1.24	3.50778	100	0
Total		35.35	100		

Tabla 3.2

Resultados obtenidos del ensayo granulométrico promedio de la cáscara de limón.

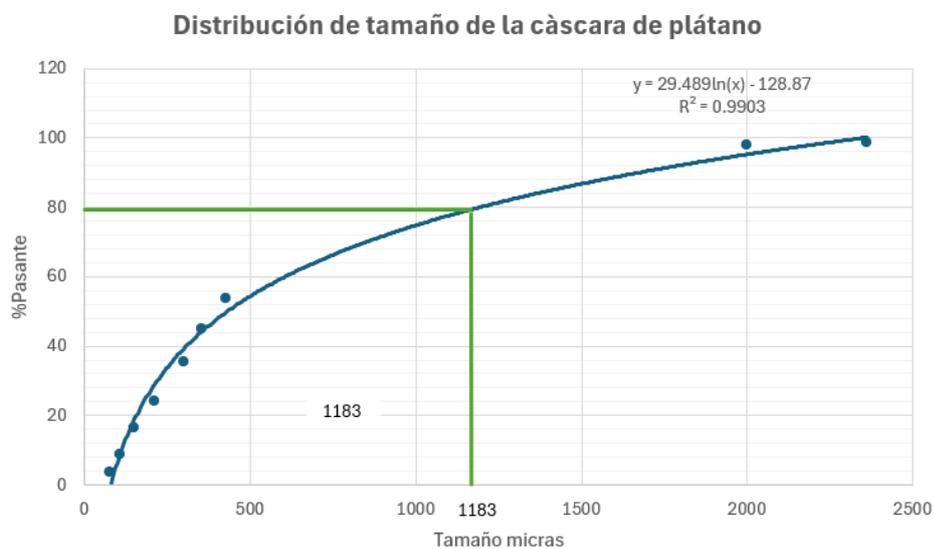
Ensayo Granulométrico por Tamizado

Tamaño máximo		Peso Seco: 35.5 gr			
Abertura Tamiz		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje Pasante
N° Tamiz	Tamaño partícula [µm]				
8	2360	0.32	0.9014	0.9014	99.09
10	2000	0.1	0.2816	1.183	98.82
40	425	17.39	48.99	50.16	49.83
45	355	2.62	7.380	57.54	42.45
50	300	2.69	7.577	65.12	34.87
70	212	4.21	11.86	76.98	23.01
100	150	2.68	7.549	84.53	15.46
140	106	2.6	7.323	91.86	8.14
200	75	1.83	5.155	97.01	2.986
Fondo		1.06	2.986	100	0
Total		35.5	100		

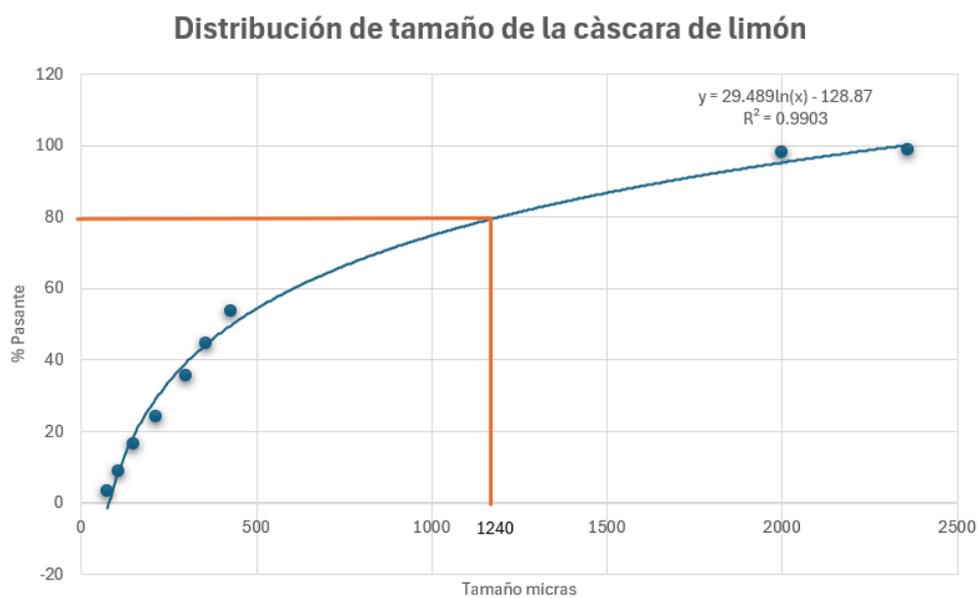
Con los datos obtenidos de la tabla 3.1 y 3.2, se realizó las figuras 3.1 y 3.2, donde se observa la distribución de tamaño

Figura 3.1

Distribución del tamaño de partículas para la cáscara de plátano

**Figura 3.2**

Distribución del tamaño de partículas para la cáscara de limón



El tamaño de D80 obtenido para el plátano fue de 1183 μm , y de 1240 μm para el limón, lo cual indica que la mayoría de las partículas de las muestras de polvo de las tienen una naturaleza fibrosa y por ende a dar partículas resistentes al molinaje (Cruzado-Muñoz et al., 2021). Cabe recalcar que estos valores de D80 son valores aproximados, ya que este ensayo

mostro limitaciones en la cobertura del rango de tamaño entre 500 y 200 μm , por la falta de la disponibilidad de los tamices necesarios.

Con esto se corrobora que los resultados obtenidos ocurren cuando el D80 de las muestras de polvo de cáscara son de 1183 y 1240 μm .

3.2 Extracción de pectina mediante hidrólisis ácida.

3.2.1 Resultados experimentales de la extracción de pectina.

Los resultados obtenidos en los 18 ensayos de extracción por hidrólisis ácida se obtuvieron con la finalidad de comprobar la factibilidad de las hipótesis nulas mencionadas en la sección 2.1.3 en torno a las cáscaras de limón y de plátano. Se las puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3

Resultados promedios obtenidos de la hidrólisis ácida a partir de cáscaras de plátano y limón

Temperatura [°C]	Rendimiento Promedio [gr]	ACG Promedio [%]
70	9.33±0.1803	58.20±0.8129
80	10.05±0.4041	55.38±0.5377
90	8.77±0.3512	49.632±0.2032
70	20.88±1.326	75.79±1.269
80	26.25±1.437	71.11±0.2032
90	32.43±1.033	67.81±0.8327

Figura 3.3

Gráfico de barras del rendimiento promedio de pectina respecto a las variables independientes

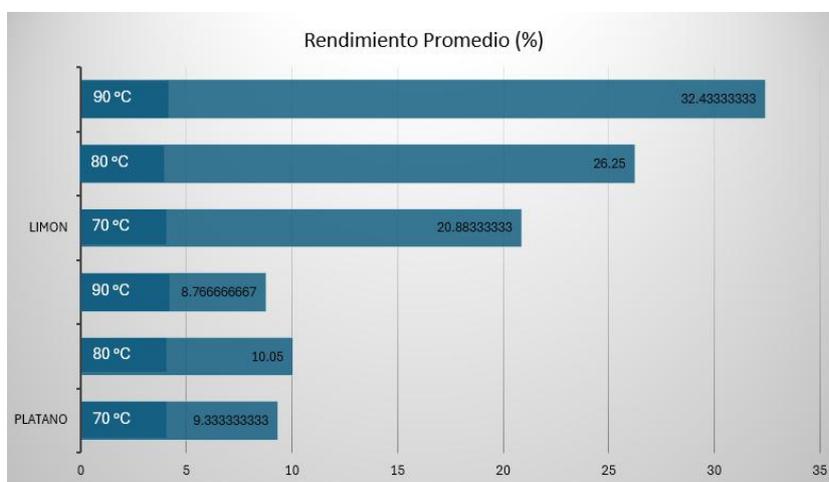
**Figura 3.4**

Gráfico de cajas y bigotes del rendimiento promedio de pectina respecto a las variables independientes

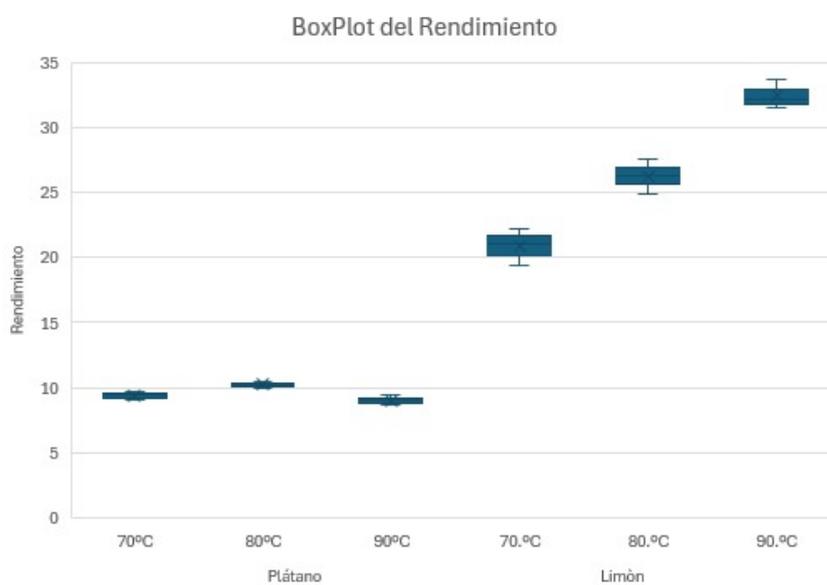
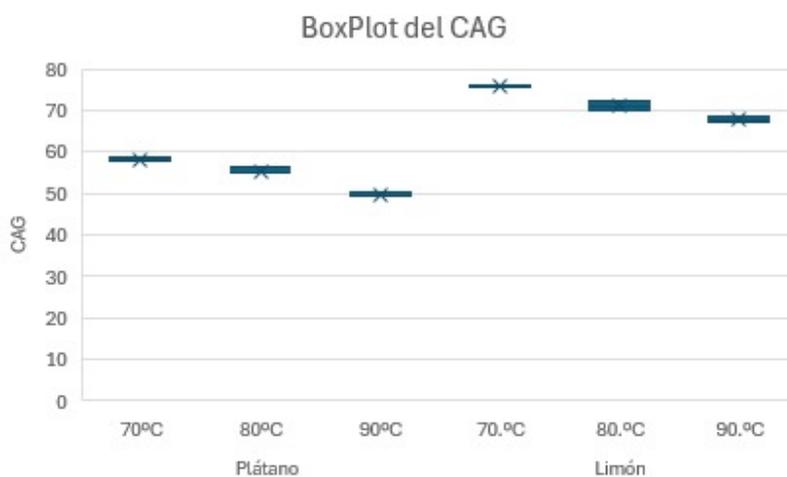


Figura 3.5

Gráfico de barras de CAG promedio de pectina con respecto a las variables independientes

**Figura 3.6**

Gráfico de cajas y bigotes de CAG promedio de pectina con respecto a las variables independientes



Tanto en el gráfico de cajas y bigotes dadas en la figura 3.4 y 3.6, se demuestra que las desviaciones son mínimas en todos los casos. En los valores donde los datos presentan mayor desviación al resto, que es en el rendimiento del limón, siguen teniendo proximidad los valores usados, para entender la replicabilidad aparente de los ensayos.

Cálculo de pectina recuperada

La pectina extraída se calcula mediante la fórmula 3.9:

$$Pectina\ recuperada = Masa\ seca \times Rendimiento\ de\ pectina\ (\%) \quad (3.9)$$

$$Pectina\ recuperada\ del\ platano = 0.35\ kg \times 9.5\ (\%) = 0.03325\ kg$$

$$Pectina\ recuperada\ del\ limón = 0.25\ kg \times 32.43\ (\%) = 0.081075\ kg$$

3.2.2 Análisis de resultados por el método estadístico ANOVA

Los resultados estadísticos obtenidos calculados por medio de un código realizado en Python fueron los tabulados en las tablas A.1 y A.2 en la sección anexos.

Y en combinación con los resultados experimentales, se obtuvieron las gráficas de interacción y curvas de respuesta para los rendimientos y el CAG:

Figura 3.7

Grafica de interacción de la Materia Prima vs Temperatura para el rendimiento promedio

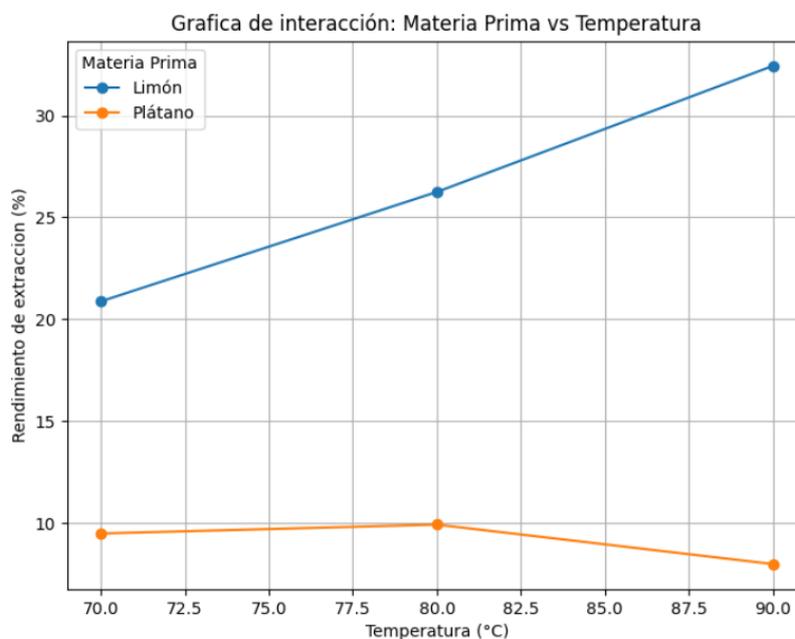
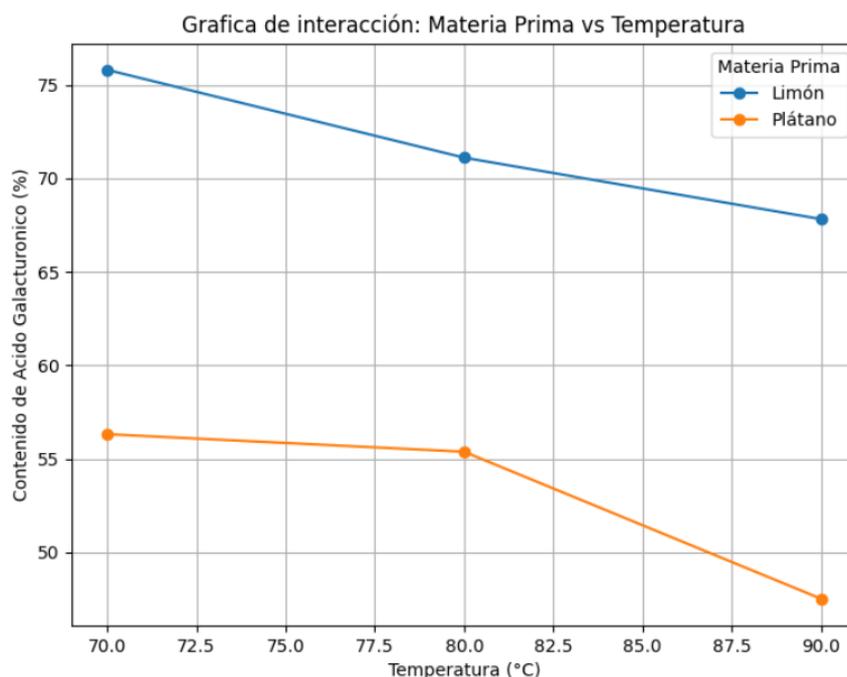


Figura 3.8

Grafica de interacción de la Materia Prima vs Temperatura para el CAG promedio



Las gráficas de interacción permiten visualizar la relación entre las variables independientes, la materia prima y la temperatura, con respecto a las dependientes, siendo el rendimiento promedio y el CAG. A su vez facilita la forma de interpretación de las tendencias y distinguir las diferencias significativas de los valores obtenidos y así determinar las condiciones óptimas de trabajo.

En el estudio presente se realizó un modelo de Análisis de Varianza (ANOVA) para evaluar el impacto de la variación de la materia prima con la variación de la temperatura en un rango de trabajo de 70 - 90 °C sobre dos variables de interés: el rendimiento total del proceso y también el CAG. En este análisis se consideraron en total tres hipótesis nulas dadas en la sección 2.1.3 .

El ANOVA aplicado para el rendimiento arrojó resultados que tanto la materia prima como la temperatura tienen efectos significativos sobre el rendimiento. Con valores de significancia extremadamente bajos ($p < 0.05$). Por otro lado, la interacción entre la materia

prima y la temperatura era estadísticamente significativa ($p < 0.05$), indicando que hay diferencia significativa en el rendimiento a temperaturas distintas.

Por ende, se rechaza la primera hipótesis nula, pues postulaba que no existía variabilidad en el rendimiento por efecto del cambio de la temperatura entre las materias primas. Indicando que el comportamiento del rendimiento frente a los cambios de temperatura es específico para cada materia prima y no poseen un comportamiento semejante. Como se ve en el rendimiento del limón, el cual presentó valores más altos a medida que aumentaba la temperatura. Mientras que los observados en el plátano mantenían un rendimiento similar, en todas las temperaturas analizadas.

En el caso del otro parámetro, el CAG, el ANOVA indicó que había valores significativos para la materia prima, temperatura, y la interacción entre ambas ($p < 0.05$). Por lo que, se rechaza la hipótesis nula, que postulaba que no había variabilidad en el CAG por efecto de la temperatura sobre las materias primas analizadas. Los resultados evidencian que el CAG no solo difiere entre el plátano y el limón, sino que posee tendencias distintas de acuerdo con la temperatura aplicada por muestra.

Por ejemplo, el CAG en las muestras de limón fue consistentemente más alto a comparación a las muestras de plátano en cualquiera de las temperaturas analizadas. Pero, las respuestas de CAG eran más pronunciadas a los cambios de temperatura en las muestras de plátano que en lo que se obtuvo en el limón. Esto sugiere que hay una mayor sensibilidad térmica por parte del plátano que en el limón, puesto que a temperaturas altas se degrada térmicamente más rápido. Esto se puede observar en la curva de respuesta de la figura 3.6. (Fraeye et al., 2007)

Finalmente, los resultados permiten rechazar la última hipótesis nula que consideraba que no existiría variabilidad notable entre las materias primas, lo que implicaba que el plátano se podía trabajar a las mismas condiciones que el limón. Según el análisis ANOVA, los valores

entregados eran notablemente pequeños ($p < 0.05$) viendo así una diferencia significativa tanto para el rendimiento como para el CAG entre las dos materias primas analizadas. Las diferencias sugieren que no es viable considerar al limón y al plátano como intercambiables, sin realizar ajustes específicos en el proceso, particularmente en términos de la temperatura aplicada.

En otras palabras, los resultados del análisis estadístico indican que el impacto de las condiciones de proceso sugiere que no se puede generalizar un proceso idéntico para ambas materias primas. Por lo tanto, cualquier estrategia de sustitución debe venir respaldada por una caracterización particular para cada materia prima y aplicar un rediseño adaptativo del proceso. De acuerdo gráficas de curva de respuesta, se recomienda para el plátano, trabajar a 75 ± 5 °C donde no hay degradación térmica que afecte el CAG y está dentro del rango de mejor rendimiento (valores están entre 9.33 y 10.05%). Mientras que, para el limón, es recomendado trabajar a temperaturas cercanas a 85 ± 5 °C donde el rendimiento logra ser mayor al 30% (alcanzando valores de hasta 32.43%) y CAG se encuentra en un porcentaje mayor al índice del 65%.

3.2.3 Análisis Experimental.

Viendo la tendencia de los datos en el rendimiento del proceso de la obtención de pectina, se puede observar un incremento entre las temperaturas de 70°C y 80°C en la muestra del plátano, siendo de 9.5 gr y 9.93 % respectivamente como se indica en la figura 3.3. Esto se da puesto a que temperaturas moderadas, la proto pectina se solubiliza con mayor facilidad en el medio ácido (S. Wang et al., 2009). Por otro lado, se observa una disminución en este mismo con la temperatura de 90°C, lo cual pudo darse ya que, a una temperatura mayor a 80°C, ocurrió una degradación termina de la pectina, reduciendo así la cantidad recuperable posible en el medio y por ende teniendo un menor rendimiento a los datos con menor temperatura (Qi et al., 2000). Con respecto a la muestra de limón, aquí podemos observar una tendencia positiva constante, como se ve en la tabla 3.1, siendo de 20.883 %, 26.25 % y de 32.43 % respectivamente con el aumento de

temperatura evidenciados en la figura 3.3. Esto indica que el limón parece tener una estructura más resistente a las altas temperaturas, dando así a poder liberar mayores cantidades de pectina sin tanta degradación significativa (Vidal-Valverde et al., 1982). Y de acuerdo con la figura 3.4 podemos evidenciar que las desviaciones para estos resultados son mínimas, por lo que la reproducción de un ensayo a las temperaturas especificadas debe de otorgar aproximadamente valores muy similares a estos rendimientos.

Para los valores de ácido galacturónico, se observa una disminución con el aumento de temperatura, siendo para el plátano de 56.32 %, 55.38 % y 47.52% respectivamente como se presenta en la figura 3.5. A su vez se observa la misma tendencia decreciente con la muestra de limón, bajando sus niveles con el aumento de temperatura, dando valores de 75.79%, 71.11% y 67.8% indicado en la figura 3.5. Estos valores son menos pronunciados con respecto al plátano, dando a entender una mejor estabilidad térmica a la del plátano (Bee Lin & Yek Cze, 2018). Y de acuerdo con la figura 3.6 se evidencia de manera gráfica que las desviaciones son mínimas en la obtención del CAG, por lo que es replicable y se obtendrán similares en iteraciones futuras a los valores presentados en esta sección.

3.3 Diagrama de Bloques de Proceso

Figura 3.9

Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina de limón por hidrólisis ácida.

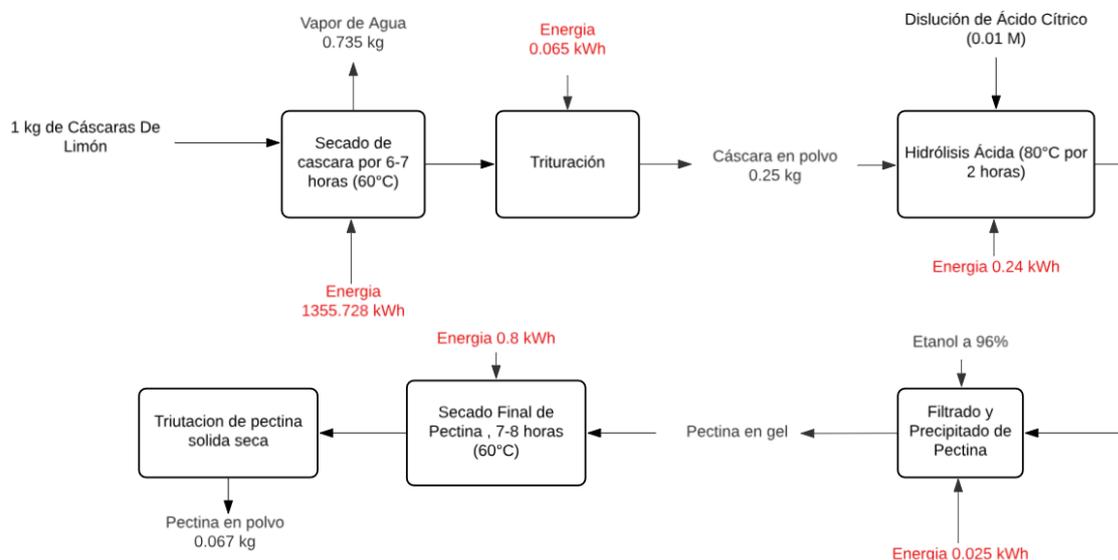
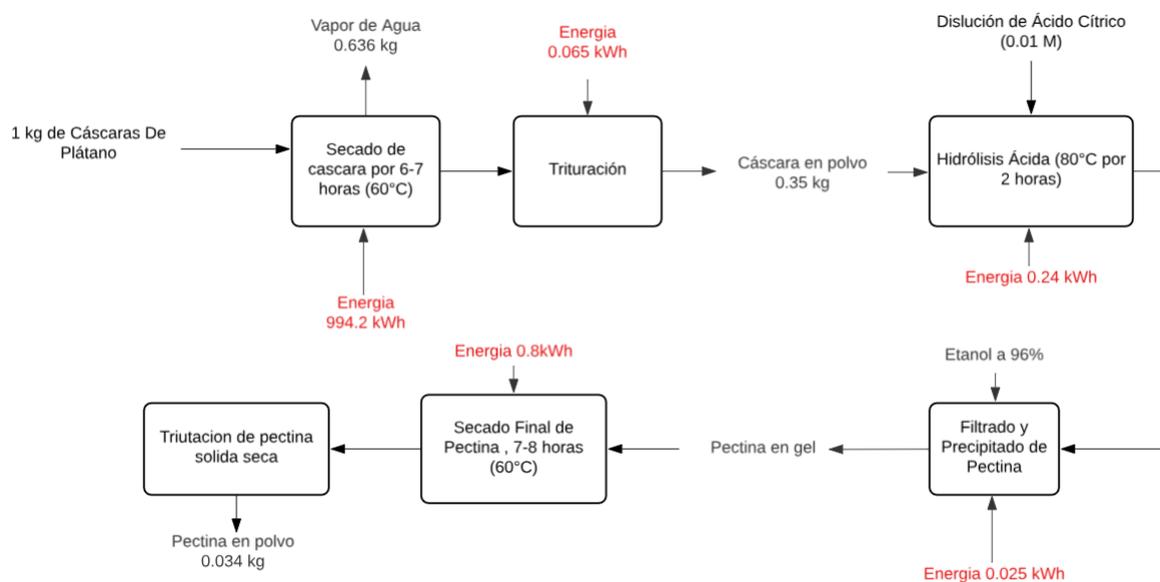


Figura 3.10

Diagrama de flujo de proceso de la extracción de pectina de plátano por hidrólisis ácida.



3.4 Análisis económico.

3.4.1 Costos Fijos

Los costos fijos están representados por el monto total invertido en equipos y materiales, calculado y presentado en la tabla A.4 en Anexos:

La amortización de los precios se los distribuye en 200 lote de producción de pectina para determinar un costo fijo por lote, tomando en consideración que cada lote son 10 kg de pectina en la ecuación 3.9:

$$\text{Costo fijo por lote} = \frac{\text{Costo fijos totales}}{\text{Número de lotes}} = \frac{2359.24}{200} = 11.796 \frac{\$}{\text{lote}} \quad (3.9)$$

3.4.2 Costos Variables y BEP

Los costos variables toman en consideración los costos relacionados a la energía consumida, el costo por transporte de materia prima y distribución, y los costos de reactivos. El costo de materia prima no se toma en cuenta porque se utiliza desechos agrónomos para el desarrollo.

El costo energético se lo calculó por medio del balance de energía realizado previamente, tomando en consideración que, en el costo energético por hidrólisis ácida, se trabajó la plancha de calentamiento a 75°C para el plátano y 85 °C para el limón. Aparte, el tiempo de secado fue de 5-6 horas para el plátano, mientras que para el limón fue de 7-8 horas. A partir de estos datos, se tomó en cuenta la energía total consumida por la tarifa de kilovatio por hora para uso general, ya que instituciones públicas no entran como área residencial. Entonces por cada lote o 10 kg producidos, los costos serán:

$$\text{Costo Energetico plátano} = 0.1028 \frac{\$}{kWh} \times E_{total\ platano} = 102.31 \frac{\$}{lote}$$

$$\text{Costo Energetico limón} = 0.1028 \frac{\$}{kWh} \times E_{total\ limon} = 139.48 \frac{\$}{lote}$$

Para tomar en consideración el costo de transporte se investigó cual es la opción más viable, y el precio de una compañía de Courier como Servipagos cuesta alrededor de \$78.15 para

traer la materia prima. Y al no tener un comprador fijo solo se toma en cuenta el costo de gasolina por galón que está en a \$2.71, al no poseer una ruta fija de transporte de pectina.

Los precios de reactivos o materiales usados para los procesos químicos en los ensayos de hidrólisis ácida están tabulados en la tabla 3.4:

Tabla 3.4

Tabla de costos variables en reactivos por lote producido

Equipo/material	Magnitud	Unidad	Cantidad
Ácido Cítrico	2.61	\$	1 litro
Etanol	10.5	\$	3.75 Litros
Hidróxido Sodio 1N	31.74	\$	1 litro
Ácido Clorhídrico 1N	31.74	\$	1 litro
Fenol Rojo	25.42	\$	1 litro
Cloruro De Sodio	3	\$	1 kg
Total	105.01	\$	---

La ecuación utilizada para calcular el total de los costos variables fue dada por la ecuación 3.10:

$$\text{Costos Variables por materia prima} = \text{Costos Energético por materia prima} + \text{Costo de transporte} + \text{Costo de reactivos (3.10)}$$

En total los costos variables estarán en \$288.18 por lote para plátano. Y el total en costos variables estarán en \$325.35 por lote de limón. Tomando en consideración los valores de costos fijos y costos variables, el costo total se lo calcula de la siguiente manera:

Teniendo en consideración la base de cálculo de 10 kg de pectina, que es el rendimiento esperado a producir por cada lote trabajado, tanto para el plátano como para el limón en ese orden, el costo por kg de cada materia prima se ve en la ecuación 3.11:

$$\text{Costo por kg plátano} = \frac{\text{Costos fijos} + \text{Costos variable por lote plátano}}{\text{Produccion} \left(\frac{\text{kg de pectina}}{\text{lote}} \right)} \quad (3.11)$$

$$= \frac{11.796 + 288.18}{10} = 29.99 \approx 30 \frac{\$}{kg}$$

$$\text{Costo por kg limón} = \frac{\text{Costos fijos} + \text{Costos variable por lote plátano}}{\text{Produccion} \left(\frac{\text{kg de pectina}}{\text{lote}} \right)}$$

$$= \frac{11.796 + 325.35}{10} = 33.72 \frac{\$}{kg}$$

Con los costos de producción por kg se toma un margen de ganancia del 30% para ser rentables, entonces el precio de venta sugerido para cada una de las materias primas sería:

$$\text{Precio de venta por kg plátano} = 30 \times 1.3 = 39 \frac{\$}{kg}$$

$$\text{Precio de venta por kg limón} = 33.72 \times 1.3 = 43.84 \frac{\$}{kg}$$

De ahí tomando en consideración todos estos datos, calculamos el BEP (Break Even Point), como la cantidad mínima de producción requerida para cubrir los costos totales por materia prima con la fórmula 3.12:

$$\text{BEP (kg)} = \frac{\text{Costos fijos totales}}{\text{Precio de venta por kg} - \text{Costo variable por kg}} \quad (3.12)$$

Entonces se obtiene primero el costo variable por kg de ambas materias primas:

$$\text{Costo variable por kg plátano} = \frac{288.18}{10} = 28.82 \frac{\$}{kg}$$

$$\text{Costo variable por kg limón} = \frac{325.35}{10} = 32.54 \frac{\$}{kg}$$

Cuando los valores normales del mercado se encuentran en el rango de 30 a 50\$ (Foods, 2024):

El BEP para cada materia prima sería:

$$\text{BEP plátano (kg)} = \frac{2359.24}{39 - 28.82} = 231.75 \text{ kg}$$

$$BEP \text{ limón (kg)} = \frac{2359.24}{43.84 - 32.54} = 209.34 \text{ kg}$$

Al comparar los BEP de ambas materias primas, se puede recomendar que económicamente hablando cualquiera de las dos materias primas son rentables, puesto que la diferencia porcentual de BEP es de 9% aproximadamente. Ahora, también es importante considerar que la pectina extraída por plátano es útil en industrias que necesiten un producto con menor CAG, como lo son para la elaboración de biofilms. Por otro lado, el limón, con su alto CAG, tiene una amplia variedad de usos, y puede ser destinado ya sea hacia la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética, entre otras.

Los datos están presentados en una amortización de un número de lotes, a continuación, se presentan en la tabla 3.9 los datos analizados en un periodo anual, tomando como base de cálculos el contenido de cáscaras anual que puede ser obtenido de acuerdo con datos obtenidos del país.

Tabla 3.5

Datos económicos anuales del diseño de extracción de pectina.

Datos	Magnitud	Unidad
Inversión Anual	60.000-70.000	\$
Ganancia Anual Esperada	15000-17000	\$
PBP	4.03	Años
BEP	209.34-231.75	Kg

Capítulo 4

4. Capítulo 4

4.1 Conclusiones

- Se consiguió desarrollar un proceso replicable a partir de la hidrólisis ácida con ácido cítrico, logrando rendimientos promedio del 9.33% al 10.05% para cáscaras de plátano y del 20.88% al 32.43% para cáscaras de limón. Este método confirma que los desechos agrícolas pueden convertirse en materias primas valiosas, apoyando las prácticas sostenibles y por ende la economía circular. Aunque datos de la pectina extraída del limón como el dato a 70 °C cumple con el índice de 65% CAG, siendo de 75.79%, mientras que el plátano obtuvo apenas 58.19% a 70 °C. El diseño del proceso demostró que había la necesidad de adaptar las condiciones a las necesidades de los diferentes tipos de residuos.
- Se consiguió la extracción de pectina a partir de cáscaras de limón y plátano, con un CAG variando entre 49.63% y 58.20% para plátano y alcanzando niveles superiores entre 67.81% y 75.79% para el limón, donde la pectina obtenida del limón si cumple con los estándares internacionales para su uso en aplicaciones alimenticias, cosméticas y farmacéuticas.
- El análisis estadístico detallado confirmó que las mejores condiciones de temperatura son de 75 °C para el plátano, siendo de 9.65% de rendimiento y un CAG de 55.29%, teniendo un mayor rendimiento sin comprometer la calidad, y 85 °C para el limón, obteniendo un rendimiento del 32.43% y un CAG del 75.79%. La interacción entre materia prima y temperatura mostró ser altamente significativa ($p < 0.05$), destacando la necesidad de ajustar los parámetros según el tipo de residuo. Además, los gráficos de respuesta evidenciaron que el limón es más resistente a la degradación térmica, mientras que el plátano requiere temperaturas más moderadas para evitar pérdidas de calidad.
- El análisis económico indicó que el proceso es competitivo, donde el costo de nuestra pectina esta entre un valor de 39-43.84 \$, en comparación a la pectina en el mercado actual,

donde su valor se encuentra entre 30-50 \$, sabiendo que el costo de producción depende en gran medida de la disponibilidad de materia prima y la eficiencia del proceso. Para evaluar la rentabilidad, se proyectó un escenario basado en costos operativos y precios de pectina importada. Los resultados mostraron que una planta a escala piloto podría reducir costos de dependencia externa, siendo el limón la materia prima más rentable debido a su alto rendimiento y calidad del producto final.

4.2 Recomendaciones

- Diseñar y operar una planta piloto para evaluar la adaptación de los parámetros a una escala mayor y validar la sostenibilidad del proceso en condiciones industriales.
- Desarrollar estrategias para la reutilización de los residuos líquidos y sólidos generados durante el proceso, por ejemplo, como materia prima para fertilizantes o biocombustibles, aumentando así la sostenibilidad del proceso.
- Identificar oportunidades en sectores emergentes, como la industria de biomateriales y farmacéuticos, para ampliar el rango de aplicaciones de la pectina extraída. Esto diversificaría las fuentes de ingresos y aumentaría el valor comercial del producto.
- Implementar programas de capacitación para agricultores y recolectores de desechos agrícolas, promoviendo la integración de una cadena de valor sostenible. Colaborar con la industria para garantizar la adopción del producto.
- Ampliar las variables estudiadas, incluyendo tiempos de extracción y concentraciones de ácido, así como evaluar tecnologías avanzadas como ultrasonido o microondas para aumentar el rendimiento y la eficiencia energética.
- Realizar un análisis de ciclo de vida completo del proceso de producción de pectina para identificar oportunidades de mejora en la sostenibilidad ambiental, así como minimizar la huella ecológica del proyecto.

5. Referencias

- Arshad, M. Y., Rashid, A., Gul, H., Ahmed, A. S., & Jabbar, F. (2022). Optimization of acid-assisted extraction of pectin from banana (*Musa Acuminata*) peels by central composite design. *Global Nest Journal*, 24(4), 752–756. <https://doi.org/10.30955/gnj.004412>
- Ashok, B., Thundil Karuppa Raj, R., Nanthagopal, K., Krishnan, R., & Subbarao, R. (2017). Lemon peel oil – A novel renewable alternative energy source for diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 139, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.049>
- Bee Lin, C., & Yek Cze, C. (2018). Drying Kinetics and Optimisation of Pectin Extraction from Banana Peels via Response Surface Methodology. *MATEC Web of Conferences*, 152. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815201002>
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Delisi, R., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2016). Pectin production and global market. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 27(5), 17–20.
- Cruzado-Muñoz, L., Valdiviezo-Quipuscoa, D., & Lujan, G. L. (2021). Effect of Granulometry on the Physicochemical and Sensory Properties of Green Banana Peel Flour-Based Snacks for Two Treatments. In *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 233). https://doi.org/10.1007/978-3-030-75680-2_81
- Cui, J., Zhang, L., Wang, J., Zhao, S., Zhao, C., Liu, D., Li, W., & Zheng, J. (2023). Study on the relationship between primary structure/ spatial conformation and gel properties of pectins from different varieties. *Food Hydrocolloids*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109055>
- de Freitas, C. M. P., Júnior, D. B. S. A., Martins, R. D., Dias, M. M. S., Coimbra, J. S. R., & de Sousa, R. C. S. (2021). Simulation of ethanol recovery and economic analysis of pectin production on an industrial scale. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(8), 1639–1647. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02546-2>
- Fraeye, I., De Roeck, A., Duvetter, T., Verlent, I., Hendrickx, M., & Van Loey, A. (2007). Influence of pectin properties and processing conditions on thermal pectin degradation. *Food Chemistry*, 105(2), 555–563. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2007.04.009>
- Ganjoo, R., Sharma, S., Verma, C., Quraishi, M. A., & Kumar, A. (2023). Heteropolysaccharides in sustainable corrosion inhibition: 4E (Energy, Economy,

- Ecology, and Effectivity) dimensions. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 235). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123571>
- Gawkowska, D., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2018). Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, *10*(7). <https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- Happi Emaga, T., Ronkart, S. N., Robert, C., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Characterisation of pectins extracted from banana peels (Musa AAA) under different conditions using an experimental design. *Food Chemistry*, *108*(2), 463–471. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.078>
- Huang, D., & Shen, L. (2003). Method for constructing comparison matrix based on the proportion scales in the AHP. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, *14*(3).
- Iñiguez-Moreno, M., Pizaña-Aranda, J. J. P., Ramírez-Gamboa, D., Ramírez-Herrera, C. A., Araújo, R. G., Flores-Contreras, E. A., Iqbal, H. M. N., Parra-Saldívar, R., & Melchor-Martínez, E. M. (2024). Enhancing pectin extraction from orange peel through citric acid-assisted optimization based on a dual response. *International Journal of Biological Macromolecules*, *263*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130230>
- Iriarte, A., Almeida, M. G., & Villalobos, P. (2014). Carbon footprint of premium quality export bananas: Case study in Ecuador, the world's largest exporter. *Science of the Total Environment*, *472*, 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.072>
- Jarrín-Chacón, J. P., Núñez-Pérez, J., Espín-Valladares, R. D. C., Manosalvas-Quiroz, L. A., Rodríguez-Cabrera, H. M., & Pais-Chanfrau, J. M. (2023). Pectin Extraction from Residues of the Cocoa Fruit (*Theobroma cacao* L.) by Different Organic Acids: A Comparative Study. *Foods*, *12*(3). <https://doi.org/10.3390/foods12030590>
- Jong, S. H., Abdullah, N., & Muhammad, N. (2023a). Effect of acid type and concentration on the yield, purity, and esterification degree of pectin extracted from durian rinds. *Results in Engineering*, *17*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100974>
- Jong, S. H., Abdullah, N., & Muhammad, N. (2023b). Effect of acid type and concentration on the yield, purity, and esterification degree of pectin extracted from durian rinds. *Results in Engineering*, *17*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100974>
- Khamsucharit, P., Laohaphatanalert, K., Gavinlertvatana, P., Sriroth, K., & Sangseethong, K. (2018). Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties. *Food Science and Biotechnology*, *27*(3), 623–629. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0302-0>

- Lacivita, V., Lordi, A., Posati, T., Zamboni, R., Del Nobile, M. A., & Conte, A. (2023). Pomegranate Peel Powder: In Vitro Efficacy and Application to Contaminated Liquid Foods. *Foods*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/foods12061173>
- Lai, J. C. H., Mahesan, D., Abdul Samat, N. A. S. B., & Bains, R. (2022). Characterization and optimization of extracted pectin from unripe banana and mango fruit peels. *Materials Today: Proceedings*, 65, 3020–3029. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.580>
- Landsheer, J. A., & Van Wittenboer, G. D. (2015). Unbalanced 2 x 2 factorial designs and the interaction effect: A troublesome combination. *PLoS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121412>
- Mollea, C., Chiampo, F., & Conti, R. (2008). Extraction and characterization of pectins from cocoa husks: A preliminary study. *Food Chemistry*, 107(3), 1353–1356. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.006>
- Müller-Maatsch, J., Caligiani, A., Tedeschi, T., Elst, K., & Sforza, S. (2014). Simple and validated quantitative ¹H NMR method for the determination of methylation, acetylation, and feruloylation degree of pectin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(37), 9081–9087. <https://doi.org/10.1021/jf502679s>
- Ngoko Tchamba, E.-I., Tybussek, T., Muranyi, P., Nguetsop, V. F., Aghofack-Nguemezi, J., & Schwab, W. (2024). The Combined Effect of Lemon Peel Extract and Calcium Chloride on the Physical and Biochemical Quality Parameters of the Dessert Banana (*Musa acuminata* var. Dwarf Cavendish) Fruit. *Agriculture (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture14020222>
- Oliveira, T. Í. S., Rosa, M. F., Cavalcante, F. L., Pereira, P. H. F., Moates, G. K., Wellner, N., Mazzetto, S. E., Waldron, K. W., & Azeredo, H. M. C. (2016). Optimization of pectin extraction from banana peels with citric acid by using response surface methodology. *Food Chemistry*, 198, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.080>
- Pan, Y., Zhou, M., Chen, Z., Li, B., Xiong, Y., & Ma, J. (2013). Is performance as important as price in demands of green products? A statistical analysis based on consumer survey in shenzhen city of China. *Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*, 1, 660–667.
- Pereira, P. H. F., Oliveira, T. Í. S., Rosa, M. F., Cavalcante, F. L., Moates, G. K., Wellner, N., Waldron, K. W., & Azeredo, H. M. C. (2016). Pectin extraction from pomegranate

- peels with citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 373–379. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.03.074>
- Qi, B., Moore, K. G., & Orchard, J. (2000). Effect of cooking on banana and plantain texture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(9), 4221–4226. <https://doi.org/10.1021/jf991301z>
- Roa, D. F., Bravo, J. E., & González, C. A. (2019). Modeling of particle size and energetic requirement in amaranth grain ball-milling | Modelado del requerimiento energético y del tamaño de partícula en la molienda de bolas del grano de amaranto. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica*, 22(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1183>
- Roman-Benn, A., Contador, C. A., Li, M.-W., Lam, H.-M., Ah-Hen, K., Ulloa, P. E., & Ravanal, M. C. (2023). Pectin: An overview of sources, extraction and applications in food products, biomedical, pharmaceutical and environmental issues. *Food Chemistry Advances*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100192>
- Rungraeng, N., & Kraithong, S. (2020). Effect of Acid Type and Concentration on Properties of Pectin Extracted from Unripe Cavendish Banana Peel and Its Application in Raspberry Jam. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 13(1), 1–8. https://doi.org/10.37221/eaef.13.1_1
- Sayah, M. Y., Chabir, R., Benyahia, H., Kandri, Y. R., Chahdi, F. O., Touzani, H., & Errachidi, F. (2016). Yield, esterification degree and molecular weight evaluation of pectins isolated from orange and grapefruit peels under different conditions. *PLoS ONE*, 11(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161751>
- Srivastava, P., & Malviya, R. (2011). Sources of pectin, extraction and its applications in pharmaceutical industry - an overview. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 2(1), 10–18.
- Tsouko, E., Maina, S., Ladakis, D., Kookos, I. K., & Koutinas, A. (2020). Integrated biorefinery development for the extraction of value-added components and bacterial cellulose production from orange peel waste streams. *Renewable Energy*, 160, 944–954. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.108>
- Tsuru, C., Umada, A., Noma, S., Demura, M., & Hayashi, N. (2021). Extraction of Pectin from Satsuma Mandarin Orange Peels by Combining Pressurized Carbon Dioxide and Deionized Water: a Green Chemistry Method. *Food and Bioprocess Technology*, 14(7), 1341–1348. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02644-9>

- Unpingco, J. (2022). Python for Probability, Statistics, and Machine Learning, Third Edition. In *Python for Probability, Statistics, and Machine Learning, Third Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-04648-3>
- Vidal-Valverde, C., Blanco, I., & Rojas-Hidalgo, E. (1982). Pectic Substances in Fresh, Dried, Desiccated, and Oleaginous Spanish Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(5), 832–835. <https://doi.org/10.1021/jf00113a008>
- Wang, F., Huang, G. H., Fan, Y., & Li, Y. P. (2020). Robust Subsampling ANOVA Methods for Sensitivity Analysis of Water Resource and Environmental Models. *Water Resources Management*, 34(10), 3199–3217. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02608-2>
- Wang, S., Cai, J., & Hu, Y. (2009). [Research on hyaluronic acid and pectin complex]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi = Journal of Biomedical Engineering = Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi*, 26(3), 561–565.
- Zeece, M. (2020). Food additives. *Introduction to the Chemistry of Food*, 251–311. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809434-1.00007-4>
- Almeida, C., Carillo, I., Chamorro, S., & Palacios, T. (2019a). *Figempa: Investigación y Desarrollo*. Portal de Revistas. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/1274/5395>
- Almeida, C., Carillo, I., Chamorro, S., & Palacios, T. (2019b). *Figempa: Investigación y Desarrollo*. Portal de Revistas. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/1274/5395>
- Chamba, L. M. A., Montoya, A. N. C., del Cisne, A., & Sánchez-Quezada, T. (2021, August 1). *Evolución en las exportaciones de Banano e Impacto del Desarrollo Económico, Provincia de El Oro 2011 - 2020, pre-pandemia, Pandemia; Aplicando series De tiempo*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8042589>
- de Freitas, C. M., Júnior, D. B., Martins, R. D., Dias, M. M., Coimbra, J. S., & de Sousa, R. de. (2021). Simulation of ethanol recovery and economic analysis of pectin

- production on an industrial scale. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(8), 1639–1647. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02546-2>
- Flores, R. B., Mariños, D. C., Rodríguez, N. B., & Rodríguez, D. S. (2022). *Optimización de las Condiciones de extracción de pectina a partir de Cáscara de Limón francés (citrus medica) utilizando La Metodología de Superficie de Respuesta*. Agroindustrial Science. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/500>
- Genius, E. (2024). *Pectin importers and buyers list in India | Ecuador Suppliers Directory of pectin*. Ecuador's Foreign Suppliers who Exports Pectin to Ecuador. <https://www.exportgenius.in/import-data/ecuador/pectin.php>
- Harryman, R. (2024, June 14). *Ethanol vs isopropyl alcohol (IPA) – which is the best wipe for your application?* Gekatex Group. <https://gekatex.com/insights/ethanol-vs-isopropyl-alcohol-ipa-which-is-the-best-for-your-application/>
- Health Organization, W. (2016). *FAO. Residue Monograph prepared by the meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 82nd meeting 2016*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/196b9f80-a9fd-4f4b-886f-3c77798453f3/content>
- CreaFoods. Pectina Alto Metoxilo (1kg). <https://www.creafoods.com/pectina-alto-metoxilo-1kg>
- Kamble, P., Gawande, S., & Patil, T. (2017, July 7). *Extraction of pectin from unripe banana peel - IRJET*. International Research Journal of Engineering and Technology. <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7462.pdf>
- Kute, A. B., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N., Giri, S. K., & Sawant, B. P. (2019). *Characterization of pectin extracted from orange peel powder using microwave-*

- assisted and acid extraction methods. *Agricultural Research*, 9(2), 241–248.
<https://doi.org/10.1007/s40003-019-00419-5>
- Morley Gaibor, J. B. (2015, June 1). *Análisis de factibilidad para la Creación de una fábrica de Pectina*. Repositorio Digital UIDE: Home.
<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/669>
- Nadar, C. G., Arora, A., & Shastri, Y. (2022a). Sustainability challenges and opportunities in pectin extraction from fruit waste. *ACS Engineering Au*, 2(2), 61–74. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00025>
- Nadar, C. G., Arora, A., & Shastri, Y. (2022b). Sustainability challenges and opportunities in pectin extraction from fruit waste. *ACS Engineering Au*, 2(2), 61–74. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00025>
- Obele, C. M., Ofoegbu, S. U., & Awuzie, C. I. (2019). Extraction of pectin from ripe plantain peel, fabrication and characterization of composite (pectin/PVA/glycerol) films produced from the extracted pectin. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 07(06), 454–467.
<https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76032>
- Primicias, R. (2023). ¿Por qué el precio del limón ha subido en Ecuador en las últimas semanas? para hacer uso de este contenido cite la fuente y haga un enlace a la nota original en <https://www.primicias.ec/noticias/economia/limon-carro-precio-ecuador-produccion/>.
- Ranganna, S. (1986). *Handbook of Analysis and quality control for fruit and vegetable products*. Tata Mcgraw-Hill.
- Ranganna, S. (1995). *Handbook of Analysis and quality control for fruit and vegetable products*. Google Books.

https://books.google.com/books/about/Handbook_of_Analysis_and_Quality_Control.html?id=jQN8Kpj0UOMC

Research, S. (2022). *Pectin market size, trend, growth to 2022-2030*. Straits Research.

<https://straitresearch.com/report/pectin-market>

Salazar Ripoll, C. S., & Hincapié-Llanos, G. A. (2022). Evaluation of sources and methods of pectin extraction from fruit and vegetable wastes: A systematic literature review (SLR). *Food Bioscience*, 51, 102278.

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102278>

Solano-Apuntes, A., Ponce-Saltos, W., & Zambrano-Gavilanes, F. (2022). Biodigestion anaerobica de residuos de musaceas: Caso Ecuador. *Biotempo*, 19(1), 51–63.

<https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i1.4803>

Xie, J., Zhang, Y., Klomklao, S., & Simpson, B. K. (2023). Pectin from plantain peels: Green recovery for transformation into reinforced packaging films. *Waste Management*, 161, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.035>

Yusufu, P. A., Mosiko, T. B., & Ojuko, O. O. (2014). Effect of firm ripe plantain fruit flour addition on the chemical, sensory and microbial quality of Fura Powder. *Nigerian Food Journal*, 32(1), 38–44. [https://doi.org/10.1016/s0189-7241\(15\)30094-1](https://doi.org/10.1016/s0189-7241(15)30094-1)

Zakaria, N. A., Rahman, R. A., Abang Zaidel, D. N., Dailin, D. J., & Jusoh, M. (2021). Microwave-assisted extraction of pectin from Pineapple Peel. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 17(1), 33–38.

<https://doi.org/10.11113/mjfas.v17n1.2164>

Apéndice A

A.1 Tabla de resultados experimentales de la hidrólisis ácida

	Temperatura [°C]	Rendimiento	%Ácido Galacturónico
Plátano	70	9.4	58.08
	70	9.7	57.728
	70	9.05	58.784
	80	10.525	54.912
	80	10.025	56.32
	80	10.275	54.912
	90	9.4	49.28
	90	8.7	50.336
	90	9.05	49.28
Limón	70	21.1	75.68
	70	19.35	75.68
	70	22.2	76.032
	80	24.9	70.048
	80	27.55	70.752
	80	26.3	72.512
	90	32.1	67.584
	90	31.55	68.64
	90	33.65	67.232

A.2 Tabla de resultados ANOVA de la cáscara de plátano.

	Sum- Sq	Df	F	PR(>F)
C (Materia Prima)	1358.942222	1	1439.144549	7.239028e-14
C (Temperatura)	76.3525	2	40.429344	4.657493e-06
C(MP):C(T)	130.260278	2	68.974003	2.626899e-07
Residual	11.331250	12	NaN	NaN

A.3 Tabla de resultados ANOVA de la cáscara de limón.

	Sum- Sq	Df	F	PR(>F)
C (Materia Prima)	1540.051001	1	2983.05333	9.348011e-16
C (Temperatura)	218.745628	2	211.85333	4.364377e-10
C(MP):C(T)	17.855943	2	17.293333	2.920906e-04
Residual	6.195200	12	NaN	NaN

A.4 Tabla de Costos Fijos por Equipos Utilizados

Equipo	Magnitud	Unidad
Secador	400	\$
Plancha Calentamiento 3 placas	874.13	\$
Bomba Ohaus	24.99	\$
Incubadora	495	\$
Molino	400	\$
Matraz Erlenmeyer 3 unidades	15.21	\$
Vaso De Precipitación 1 L	1.82	\$
Vasos De Precipitación 600 MI	5.46	\$
3 agitadores De Vidrio	7.14	\$
1 malla	1	\$
3 termómetros De Mercurio	56.25	\$
3 crisoles De Cerámica	22.2	\$
1 pliego Papel Filtro	1.15	\$
Espátula	4.54	\$
1 probeta 100 MI	9.83	\$
Bureta 50 MI	27.94	\$
2 balones Volumétricos 100 MI	7.78	\$
1 balón Volumétrico 50 MI	4.8	\$
Total	2359.24	\$