

INTRODUCCIÓN

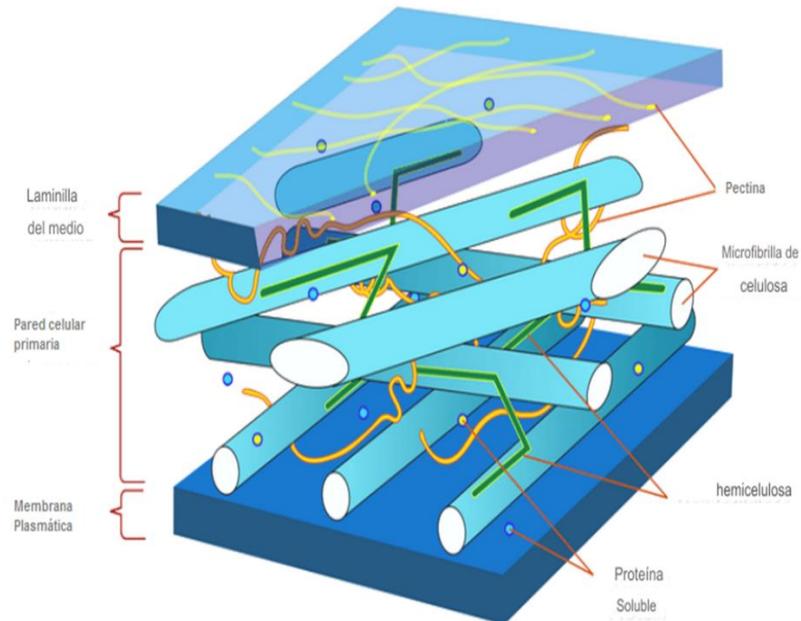
Antecedentes

En 1927, la Sociedad Química Americana tomó la iniciativa de establecer una nomenclatura estándar para las sustancias pectínicas, y en 1944 se logró consenso en su aceptación. En ese contexto, el término "pectina" fue definido como aquellos ácidos pépticos con la capacidad de formar un gel estándar cuando se combinan en proporciones adecuadas con la fruta, azúcar, agua y ácido. (de Oliveira et al., 2002)

Una alternativa que se destaca desde principios de los años 1970 consiste en utilizar los residuos de determinadas frutas (principalmente cáscaras) como materia prima para la producción de algunos ingredientes perfectamente funcionales susceptibles de ser incluidos en la alimentación humana, como las pectinas, que hasta ahora han estado aislados, con fines comerciales, de cáscaras de orujo de naranja, limón y manzana.

Las pectinas comprenden un grupo de polisacáridos ácidos que pueden presentar gran diversidad en su fina estructura. Por lo tanto, existe la necesidad de pectinas con características estructurales y masa molar distintas que conducen a productos con diferentes propiedades funcionales. Considerando que la pectina cítrica comercial comúnmente utilizada por industrias tiene un alto grado de esterificación, es necesario optimizar la extracción de pectina de maracuyá amarilla, minimizando la degradación de la molécula.

Figura 1 Diseño estructural de la pared celular



Fuente: Rodríguez & Castro, 2019

La pectina contribuye a la firmeza y estructura del tejido vegetal, estando involucrada en la adhesión intercelular y la resistencia mecánica de la pared celular. También tienen un papel importante en el desarrollo de las células vegetales proporcionando turgencia y resistencia. (Rodríguez & Castro, 2019)

En la actualidad, el sector agroexportador ha crecido de manera sostenible con productos primarios como el banano, cacao, café, flores, mango y otras frutas tropicales. Sin embargo, al considerar que la industria interna de alimentos necesita de insumos derivados de las varias especies de frutas cultivadas con mucho éxito, con lo que al ser sometidas a procesos de industrialización se adicionaría valor agregado, ya que en diferentes zonas climáticas de la región o el país se cuenta con una diversidad y disponibilidad de recursos fitogenéticos de manera particular las frutas tropicales entre las que se cuentan: maracuyá, mango, papaya, piña, banano y cítricos, entre otras de trascendental importancia económica local y regional.

Las importaciones de los derivados de las frutas entre ellos la pectina, que es un hidrato de carbono de uso regular en el procesamiento de alimentos de uso diario en la dieta alimenticia de la población, ocurre en altos volúmenes lo que conlleva a la salida de importantes montos de dólares que bien podrían quedarse en el país y generar riqueza y fuentes de trabajo con mano de obra calificada.

Tabla 1 Importaciones Nacionales de Materias Pécticas (toneladas)

Proveedores	2018	2019	2020	2021	2022
	Cantidad importada (t)				
Mundo	157	203	261	446	307
América					
México	61	37	147	330	184
Chile	45	45	29	24	29
Brasil	3	3	11	22	17
Perú	19	22	20	15	26
Argentina	3	2	13	9	11
Estados unidos	10	43	10	6	6
Europa y Asia					
China	14	14	6	4	10
Alemania	2	2	8	3	2
Países bajos	0	1	1	2	1
India	1	22	4	27	1
Irlanda	5	5	4	2	12
Dinamarca	3	6	5	2	2

Fuente: Trademap, 2023

Las empresas que se destacan por importar una cantidad significativa de pectina en Bolivia son: Pil Andina, Química Anders Ltda, y Sameq SRL, distribuidora Inalim. Estas empresas desempeñan un papel fundamental en el suministro de pectina en el mercado nacional, abasteciendo las necesidades de la industria alimentaria y otros sectores relacionados.

Este proyecto tiene como propósito aprovechar la cáscara de maracuyá para extraer pectina, que surge de la necesidad de aprovechar un subproducto de la industria

alimentaria, crear un producto sostenible y de alto valor agregado, y así poder contribuir al desarrollo de la industria alimentaria en la región.

El centro de origen del maracuyá es Brasil, específicamente la región del Amazonas. Este país es considerado el origen de unas 150-200 especies de las 465 existentes de *Passiflora*. La especie *Passiflora edulis* (maracuyá morado), dio origen, a través de una mutación, a *Passiflora edulis* forma *flavicarpa* (maracuyá amarillo).

En Bolivia de acuerdo al censo agropecuario realizado el 2013 la superficie y producción de maracuyá se registra con un total de 411,4 ha (1375 t). (INE, 2013)

Este fruto se produce en mayor cantidad en el Chapare ciudad de Cochabamba, también se produce en Santa Cruz, de igual manera en la comunidad de Urucú, Vaca Diez - Beni y se tiene información de que también se produce en Serranía del Iñaño, Bolivia, Chuquisaca.

Tabla 2 Producción de maracuyá en toneladas métricas en Bolivia en el año 2016

Departamento	Cochabamba	La Paz	Beni
Producción (t)	737	186	94

Fuente: Condori, 2016

En Uriondo, provincia de Tarija el 95 % de las unidades económicas de pequeña escala se dedicaron al Sector Productivo, entre los que destacan: Actividad agropecuaria (producción de uva, papa, cebolla y frutas de pepitas como maracuyá, chirimoya, manzana y crianza de ganado y producción de leche cruda). (MDPyEP-DAPRO, 2017)

En Tarija no está disponible la información de la cantidad en toneladas métricas de producción. Sin embargo, existe información de que si se produce actualmente, incluso hay una investigación que se dirige a la agricultura tradicional, y es la de apostar por cultivos alternativos que van teniendo gran demanda a nivel local tal es el caso del maracuyá. Así como también existen diversos trabajos de investigación que

buscan y analizan alternativas para producir plantones de maracuyá aptos y de buena calidad en Tarija. (Biblioteca.UAJMS, 2019)

Planteamiento del problema

Bolivia no produce algunas materias primas empleadas en las industrias de alimentos, como, por ejemplo, la pectina; una sustancia altamente valorada en el ámbito comercial que desempeña un papel crucial en la industria alimentaria. Sin embargo, su disponibilidad se ve limitada por la dependencia de importaciones de otros países, lo que conlleva a significativos gastos para nuestra nación.

Objetivos

Objetivo General

Obtener pectina a partir de la cáscara de maracuyá (*Passiflora Edulis f. flavicarpa*) producido en el departamento de Tarija a nivel laboratorio.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de materia prima; cáscara de maracuyá.
- Analizar y seleccionar el proceso tecnológico experimental, así como las variables de operación.
- Ejecutar la fase experimental de la extracción de pectina de la cáscara de maracuyá a nivel laboratorio.
- Caracterizar fisicoquímicamente la pectina obtenida e identificar sus componentes.
- Determinar el rendimiento del proceso.
- Determinar el costo de producción de la pectina de cáscara de maracuyá a escala laboratorio.

Justificación

Justificación tecnológica

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá requiere el uso de tecnologías sostenibles, como la extracción por el método enzimático, la extracción asistida por microondas, la hidrólisis ácida convencional, etc. Lo que permite mejorar la eficiencia del proceso y obtener pectina de mayor calidad.

Justificación económica

En Bolivia no existe producción de pectina, por lo tanto, no se aprovecha industrialmente la cáscara de maracuyá, sino que se comercializa como producto. Bolivia importa este aditivo de otros países generando altos costos por importación y tiene un alto valor comercial, por lo cual, se percibió realizar un estudio sobre la extracción de este compuesto químico muy utilizado en la industria.

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá tiene un potencial económico importante, ya que permite obtener un producto de alto valor agregado a partir de un residuo que de otra manera se descartaría. Además, la producción de pectina puede generar empleo y contribuir al desarrollo de la industria local.

Justificación social

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá puede generar empleo en las comunidades locales, especialmente en zonas rurales donde la producción de maracuyá es importante. Puede contribuir al desarrollo de la industria local y a la diversificación de la economía en las zonas productoras de maracuyá.

La generación de ingresos a través de la producción de pectina puede mejorar la calidad de vida de las personas involucradas en la cadena productiva, especialmente de los pequeños productores, puede contribuir a la sostenibilidad de la producción de maracuyá al reducir la cantidad de residuos generados y al aprovechar los recursos de manera más eficiente.

Justificación ambiental

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá reduce significativamente la cantidad de desperdicios generados en la industria agroalimentaria. Esto se debe a que la cáscara representa el 50 % del fruto a comparación de otras materias primas, lo que significa que se puede aprovechar una gran cantidad de material que de otra manera sería desechado.

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá tiene un menor impacto ambiental a comparación de extracción de pectina de otras fuentes como el limón, debido que en el proceso de extracción requiere menor cantidad de agua en las diferentes etapas del proceso y un menor consumo energético en la etapa de secado lo que contribuye a una gestión más sostenible de los recursos.

Justificación personal

La extracción de pectina de la cáscara de maracuyá puede proporcionar una satisfacción personal al contribuir a la sostenibilidad y al aprovechamiento de recursos, así como al fomento de hábitos alimenticios saludables y la creatividad culinaria, puede contribuir a la comunidad al proporcionar un producto de alta calidad y valor agregado que puede ser utilizado por pequeñas empresas y emprendedores locales.

La pectina a partir de cáscara de maracuyá posee propiedades biológicas útiles como su capacidad prebiótica lo que la hace valiosa en la industria alimentaria y farmacéutica. Además, se demostró que es beneficioso para la salud ya que ayuda a disminuir la velocidad de la digestión de los alimentos lo que puede contribuir a la pérdida de peso y mejorar la salud cardiovascular.

Este proyecto representa una oportunidad para adquirir conocimientos y habilidades en el campo de la tecnología de alimentos y la química de productos naturales.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

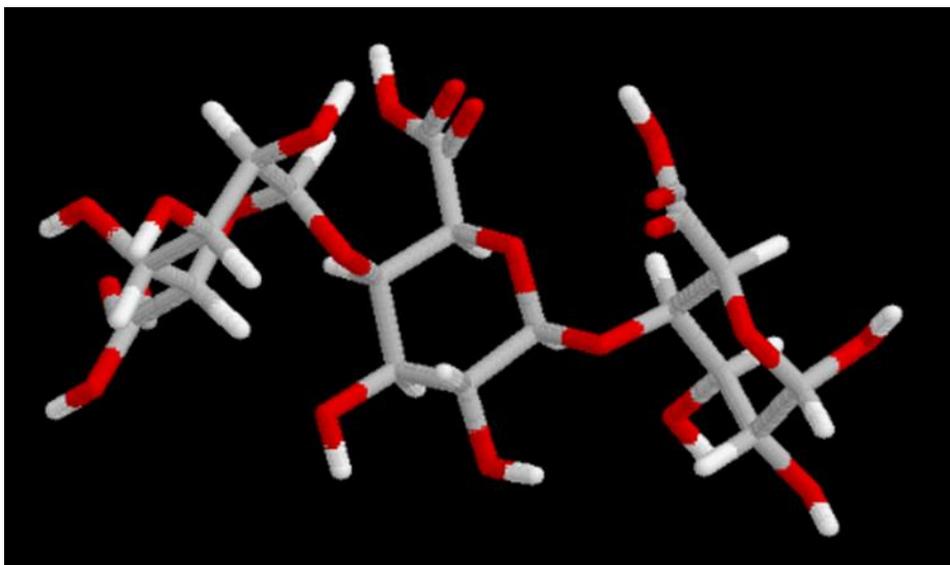
1.1. Origen de la pectina

La producción comercial de pectinas comenzó en 1908 en Alemania, a partir de los restos de la fabricación de zumo de manzana. Actualmente se obtienen de los restos de la extracción de zumo de manzana y, sobre todo, de los de la industria de los zumos de cítricos. La pectina de manzana suele ser de un color algo más oscuro, debido a las reacciones de pardeamiento enzimático. La pectina se extrae con agua caliente acidificada, precipitando la solución con etanol o con una sal de aluminio.

Las pectinas están formadas fundamentalmente por largas cadenas formadas por unidades de ácido galacturónico, que puede encontrarse como tal ácido, con el grupo carboxilo libre, o bien o con el carboxilo esterificado por metanol (metoxilado).

Las unidades de ácido galacturónico están unidas entre sí por enlaces α 1- 4.

Figura 1-1 Tres unidades de ácido galacturónico no metoxilado unidas entre sí por enlaces α 1- 4



Fuente: Calvo, 2021

En las frutas, la mayoría de los grupos ácidos del ácido galacturónico están esterificados por metanol. Este metanol puede perderse con relativa facilidad por hidrólisis ácida o enzimática, dejando el grupo ácido libre. En función del porcentaje de restos de ácido galacturónico esterificado, las pectinas se clasifican como "de alto

metoxilo", cuando este porcentaje es superior al 50 % y "de bajo metoxilo", cuando es inferior.

1.2. Clasificación de la pectina de acuerdo a su composición

1.2.1. Geles de pectina de alto metoxilo

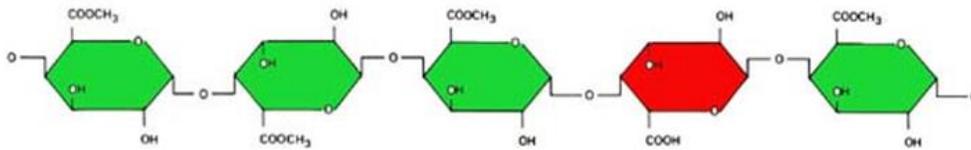
La primera condición para obtener geles de pectina de alto metoxilo es que el pH sea bajo. Para que los grupos ácidos, minoritarios, se encuentren fundamentalmente en forma no ionizada y no existan repulsiones entre cargas. A pH 3,5, aproximadamente la mitad de los grupos carboxilo del ácido galacturónico se encuentran ionizados, pero por debajo de pH 2 el porcentaje es muy pequeño. Las cadenas de pectinas de alto metoxilo pueden entonces unirse a través de interacciones hidrofóbicas de los grupos metoxilo o mediante puentes de hidrógeno, incluidos los de los grupos ácidos no ionizados, siempre que exista un material muy hidrófilo (azúcar) que retire el agua. En consecuencia, las pectinas de alto metoxilo formarán geles a pH entre 1 y 3,5, con contenidos de azúcar entre el 55 % como mínimo y el 85 %.

El grado de esterificación de las pectinas de alto metoxilo influye mucho sobre sus propiedades. En particular, a mayor grado de esterificación, mayor es la temperatura de gelificación. Por ejemplo, una pectina con un grado de esterificación del 75 % es capaz de gelificar a temperaturas de 95 °C, y lo hace en muy pocos minutos a temperaturas por debajo de 85 °C. Por esto se llaman "pectinas rápidas", por ejemplo, las que se utilizan en la fabricación de gominolas, que, con una concentración muy elevada de azúcar, hasta el 80 % de sólidos, forman geles que pueden desmoldarse al poco tiempo.

En cambio, una pectina con un grado de esterificación del 65 % no gelifica a una temperatura de 75 °C, y tarda alrededor de media hora en hacerlo a 65 °C. Es lo que se llama una "pectina lenta". Además, las pectinas con un grado de esterificación mayor forman geles que son irreversibles térmicamente, mientras que los geles formados por pectinas de grado de esterificación menor son reversibles.

Para cada tipo de pectina con un grado de metoxilación concreto existe una combinación óptima de concentración de azúcar y pH, aunque se pueden obtener geles dentro de un cierto rango de pH.

Figura 1-2 Pectina de alto metoxilo

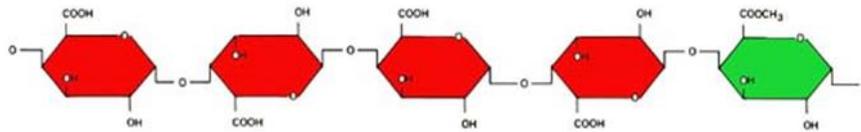


Fuente: Calvo, 2021

1.2.2. Geles de pectina de bajo metoxilo

En el caso de las pectinas de bajo metoxilo, el mecanismo de formación de geles es totalmente distinto, ya que la unión entre cadenas se produce a través de iones de calcio, que forman puentes entre las cargas negativas. La estructura es semejante a la "caja de huevos" de los geles de alginato, pero algo menos ordenada, dada la presencia de grupos esterificados entre los galacturónicos sin esterificar. La concentración de calcio es importante hasta llegar a una cierta cantidad, que depende de cada tipo concreto de pectina, y que se conoce como "saturación de calcio". Suele estar en torno a las 500 ppm. Por encima, una mayor cantidad de calcio no tiene efecto, o incluso en algunos casos puede llegar a debilitar el gel. Esto no sucede en el caso de otros geles de este tipo, como es el de alginato. Las pectinas de bajo metoxilo forman geles de consistencia máxima con cantidades de calcio que oscilan de 20 a 100 mg/g de pectina. La presencia de azúcar reduce mucho la cantidad de calcio necesaria. Consecuentemente, a menor cantidad de azúcar presente en el producto, es necesario utilizar pectinas de metoxilo menor para obtener la misma consistencia.

Figura 1-3 Pectina de bajo metoxilo



Fuente: Calvo, 2021

En los vegetales, la pectina se encuentra en forma insoluble, la llamada "protopectina", que se solubiliza durante la maduración de las frutas y en la extracción con ácido, formando la pectina soluble. En este proceso se pierden sobre todo las regiones ramificadas. La pectina de remolacha azucarera contiene algunos grupos ferolilo en lugar del metanol.

1.3. Las pectinas como estabilizantes

Las pectinas se comportan muy bien como estabilizantes de las caseínas frente a los tratamientos térmicos a pH ácido. Dado que a pH por encima de 3,5 las pectinas tienen carga negativa, son capaces de unirse a las regiones con carga positiva de las micelas, formando una "bola peluda" que se mantiene en suspensión.

Las pectinas, como muchos otros polisacáridos, se hinchan muy rápidamente con el agua, y por eso cuando se añaden de golpe, y especialmente si se añade agua sobre el sólido, forman agregados difíciles de disolver. La solución es separar las partículas cuando se mezcla el polisacárido con el agua, con sistemas mecánicos o mezclándolo previamente con otro material no acuoso. Son relativamente inestables desde el punto de vista químico, especialmente a temperaturas elevadas. Su máxima estabilidad está en torno a pH 4. Pueden perder grupos metoxilo, hidrolizarse, y en medio neutro o alcalino romperse por beta-eliminación. Esto afecta muy negativamente a su viscosidad y capacidad de formación de geles.

1.4. Clasificación de las sustancias pécticas

1.4.1. Protopectina

Es una sustancia péctica insoluble en agua que, mediante una hidrólisis controlada, puede dar origen a pectina o ácidos pectínicos.

1.4.2. Ácidos pectínicos

Son polímeros de ácido galacturónico con un grado de esterificación muy bajo, no significativo. En condiciones adecuadas de concentración, sólidos solubles y acidez, pueden formar geles con azúcar.

1.4.3. Ácidos pécticos

Son sustancias pécticas en las cuales los grupos carboxilo de los ácidos galacturónicos están totalmente desesterificados.

1.4.4. Pectinas

Son los ácidos pectínicos solubles en agua que contienen los grupos carboxílicos del ácido poligalacturónico parcialmente esterificados con metanol. Son capaces de formar geles en condiciones apropiadas.

1.5. Aplicaciones potenciales de la pectina

“Las posibilidades de aplicación de la pectina son muy amplias y numerosas, abarcando desde las principales categorías de aplicaciones alimentarias, hasta los sectores industrial y farmacéutico” (Chandel et al., 2022).

1.5.1. Industria de alimentos

1.5.1.1. Mermeladas, jaleas y agente emulsionante

Los hidrocoloides de pectina son el ingrediente principal para la preparación de alimentos de humedad intermedia, tales como jaleas, mermeladas, dulces, pasteles y yogures, etc., debido a sus versátiles propiedades gelificantes. La pectina se agrega tarde en el proceso, lo que la somete a menos calentamiento y conduce a una disolución conveniente y completa. La pectina con alto contenido de metoxilo se

utiliza como agente gelificante y texturizador en mermeladas y jaleas. La tendencia de productos sin azúcar o con bajo contenido de azúcar, como alimentos dietéticos, mermeladas bajas en calorías y bebidas carbonatadas, debido particularmente a consumidores conscientes de las calorías y para cubrir la necesidad de productos sin azúcar para diabéticos, ha llevado a un aumento en la demanda de pectina de bajo metoxilo.

1.5.1.2. Productos de panadería

La pectina también ha recibido atención de los panaderos debido a sus propiedades, y puede usarse como agente formador de estructura, potenciador del efecto oxidante en el proceso de producción de masa y como sorbente para mejorar la calidad de los productos de panadería. El consumo de alimentos enriquecidos con sustancias pécticas se está convirtiendo en una parte esencial de nuestra dieta, ya que estos productos aumentan la resistencia del cuerpo a las condiciones ambientales adversas, y también debido a su capacidad para unirse a las toxinas introducidas a través de los alimentos o formadas en el cuerpo. Se estableció que la pectina promueve los procesos de fermentación, bioquímicos y microbiológicos en la masa, y también afecta la elasticidad del gluten. En la producción de pan, se ha observado que la pectina facilita un aumento en el volumen de la masa al retener el gas en la masa, retener la estructura y dificultar el proceso de envejecimiento.

1.5.2. Salud y farmacia

1.5.2.1. Reducción de las concentraciones plasmáticas de LDL

Se ha revelado que la pectina juega un papel importante en la reducción de las concentraciones plasmáticas de LDL en humanos, ya que los niveles de colesterol LDL en sangre se redujeron ligeramente en un 3–7 % después del consumo de 15 g/día de pectina durante un período de 4 semanas. La pectina recubre las micelas, impidiendo así que se agrupen al causar una repulsión electrostática entre las micelas, lo que aumenta la viscosidad en el tracto intestinal, lo que reduce la absorción de colesterol de la bilis o de los alimentos. La pectina ayuda al evitar que los ácidos

biliares descompongan los ácidos grasos ingeridos en los fragmentos más pequeños necesarios para la digestión y la absorción en la pared intestinal.

1.5.2.2. Usos terapéuticos y farmacéuticos

La pectina se utiliza como un remedio eficaz para el estreñimiento, como la motilidad intestinal baja, heces secas y defecación dolorosa, ya que absorbe moléculas de agua en el intestino; esto ocurre cuando los enlaces de hidrógeno de la pectina se hinchan en el medio, lo que conduce a un aumento en el volumen del contenido de agua. (Chandel et al., 2022)

1.5.2.3. Control glicémico

La pectina ha demostrado numerosos beneficios para la salud, como la reducción de los niveles de glucosa y colesterol en la sangre, una menor ingesta calórica debido al aumento de la saciedad y una mejor resistencia a la insulina. La pectina ha mostrado efectos beneficiosos en la prevención y el tratamiento de enfermedades relacionadas con el estilo de vida, como la diabetes y la obesidad.

Tanto en su forma natural como en su forma de complemento dietético, la pectina desempeña importantes funciones, especialmente relacionadas con la salud gastrointestinal.

Tabla I-1 Información nutricional por 100 gramos de producto

Información nutricional por 100 gramos de producto	
Proteínas	0,30 g
Grasa	0,30 g
Carbohidratos	90,4 g
Fibra	8,6 g

Fuente: Información nutricional de pectina, 2020

Hay minerales presentes en la pectina, como Sodio (200 mg), Calcio (7 mg) o Potasio (7 mg) pero no Flúor o Selenio. Contienen algunas vitaminas importantes: Vitamina A (3 UI), Vitamina B-9 (1 mg) o Vitamina B-5 (0,11 mg).

1.5.3. Envasado de alimentos

1.5.3.1. Película de embalaje

La pectina posee la capacidad de formar geles e impartir firmeza, características que se emplean significativamente para la formación de películas en el envasado de alimentos. El comportamiento de gelificación depende de la presencia de iones de calcio, ácidos o azúcares. Estas películas evitan el deterioro de los alimentos al actuar como una barrera entre el ambiente externo e interno. Estas películas a base de pectina sirven como un avance reciente en las industrias alimentarias donde las propiedades de la pectina se modificaron mediante la incorporación de aditivos en la formación de películas para mejorar la resistencia a la tracción y prolongar la vida útil de los alimentos envasados.

1.5.3.2. Material de revestimiento

Los revestimientos a base de pectina también han recibido una atención considerable recientemente. El recubrimiento se puede lograr mediante el uso de varios métodos bien conocidos, como el recubrimiento por inmersión, el recubrimiento por pulverización, la electropulverización, el método Panning, etc. Hay muchos informes sobre el uso de pectina y formulación de compuestos bioactivos funcionales como materiales de recubrimiento para mejorar la vida útil de frutas, carnes y otros productos alimenticios. Recientemente, se utilizó un recubrimiento a base de pectina que incluía aceite esencial de naranja y limón para prolongar la vida útil de las rodajas de manzana, el estudio mostró que el recubrimiento disminuyó el recuento microbiano y la pérdida de peso de la manzana. En otro informe, el aceite de canela incluido en la formulación a base de pectina, cuando se usa en recubrimientos de uva, mejoró la vida útil al reducir el crecimiento de hongos y mejorar la actividad antioxidante. (Chandel et al., 2022)

1.5.4. Pectina como modificador de reología

Se utilizaron pectina, gelatina y 3-glicidiloxipropil trimetoxi silano (agente reticulante) para desarrollar un método adecuado para la bioimpresión. El agente reticulante requiere un paso adicional de liofilización para completar la reacción de reticulación. En el caso de una solución de menor viscosidad, la pectina es esencial para aumentar la viscosidad y el límite elástico. Los andamios 3D hidroestables y autoportantes, con estructuras micrométricas y microporosas, respectivamente, se pueden preparar combinando extrusión y liofilización. (Agarwal et al., 2021)

1.5.5. Pectina en terapia génica

La terapia génica es un término utilizado para describir el proceso de tratamiento de trastornos genéticos, ya que se dirige a los genes defectuosos que causan los trastornos. Estos genes defectuosos se pueden reemplazar, se puede silenciar su expresión o se pueden completar los genes faltantes utilizando vectores virales o no virales. Los vectores no virales se eligen en lugar de los virales por diversas razones, incluida la biocompatibilidad, la baja toxicidad y las reacciones del sistema inmunológico. Estos vectores no virales se construyen a partir de pectina, quitosano o polímeros policatiónicos. Los productos mediados por carbohidratos tienen una capacidad de unión superior, lo que facilita la absorción por parte de la célula diana.

La creación de nanopartículas de pectina ayuda a atrapar el ADN para la transfección. Al agregar tres grupos de aminas diferentes a la pectina, se pudo modificar y lograr que se uniera al ADN plasmídico. Se descubrió que la pectina modificada tiene un papel prometedor en la administración de genes al comparar la efectividad de su transfección o su potencial como portador de administración de genes no viral. Las nanopartículas a base de pectina y quitosano también se han empleado como material para apósitos para heridas. Tienen la capacidad de producir un ambiente ácido que previene el crecimiento bacteriano. La nanopartícula a base de pectina se creó para aumentar y mejorar la solubilidad del medicamento itraconazol. (Chengaiyan et al., 2023)

1.6. Contenido péctico de algunas frutas base húmeda y base seca

Tabla I-2 Contenido péctico de algunas frutas (base húmeda)

Fruta	% Sustancias pécticas (base húmeda)	Referencia
Banana (<i>Musa acuminata L.</i>)	0,7-1,2	Karr (1976)
Pulpa de remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	1	Renard e Thibault (1993)
Carambola (<i>Averrhoa carambola</i>)	0,66	Hodgson e Kerr (1991)
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	0,2-0,5	Renard e Thibault (1993)
Guayaba (<i>Psidium guajava L.</i>)	0,77-0,99	Hodgson e Kerr (1991)
Limón (<i>Citrus limon</i>)	2,5-4,0	Renard e Thibault (1993)
Mango (<i>Mangifera indica L.</i>)	0,26-0,42	Hodgson e Kerr (1991)
Cáscara de naranja (<i>C. sinensis</i>)	3,5-5,5	Renard e Thibault (1993)
Mamón (<i>Carcia papaya</i>)	0,66-1,0	Hodgson e Kerr (1991)
Maracuyá (<i>Passiflora edulis S.</i>)	0,5	Hodgson e Kerr (1991)
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	0,1-0,9	Karr (1976)
Piña (<i>Ananas comosus L.</i>)	0,04-0,13	Hodgson e Kerr (1991)
Frutilla s (<i>Fragaria ananassa</i>)	0,6-0,7	Hodgson e Kerr (1991)
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	0,2-0,6	Karr (1976)

Fuente: del Puerto & Maldonado, 2022

Tabla I-3 Contenido péctico de algunas frutas (base seca)

Fruta	% Sustancias pécticas (base seca)
Cítricos	20-35
Manzana	10-15
Remolacha	10-20
Maracuyá	15-20

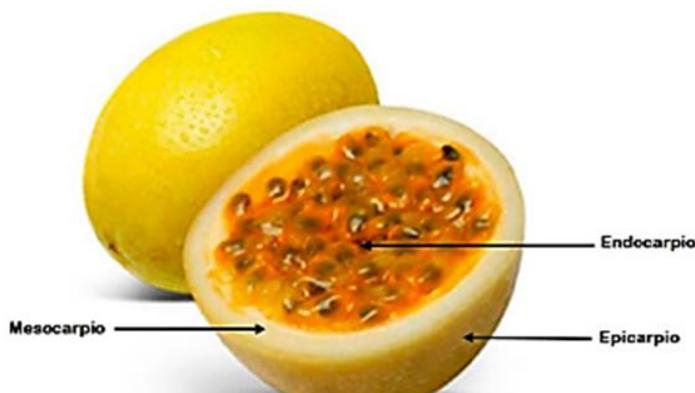
Fuente: Baltazar , Carbajal, Baca, & Salvador, 2013

1.7. Descripción de la materia prima

1.7.1. Maracuyá

El maracuyá es una fruta ácida del género *Passiflora*, perteneciente a la familia *Passifloraceae*, el cual posee cerca de 525 especies tropicales y subtropicales. La clase más cultivada en Brasil y en el mundo es el maracuyá amarillo o *Passiflora edulis flavicarpa*, siendo producida alrededor de 690,4 t del mismo durante el 2020 en todo el Brasil según datos del Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística “IBGE”. El maracuyá es de carácter ovalado con aproximadamente 80 g de peso, revestida por una cáscara gruesa, cerosa y de color amarillo intenso (epicarpio), con una capa en medio de la fruta de carácter blanquecino, esponjoso y poroso (mesocarpio), contando en su interior una pulpa que envuelve numerosas semillas de aspecto negro, suspendidas en un fluido gelatinoso de color amarillo-naranja (endocarpio). (del Puerto & Maldonado, 2022)

Figura 1-4 Morfología del maracuyá



Fuente: Escobedo, 2013

Según Ferrari, Colussi y Ayub como se citó en del Puerto & Maldonado (2022), el maracuyá in natura está compuesto por 50,3 % de cáscara, 23,2 % de jugo y 26,2 % de semillas y es rica en minerales como el calcio, el hierro y el fósforo, vitaminas A, B, C, carbohidratos como la pectina, proteínas y grasas. El jugo es el principal producto obtenido del maracuyá en la industria, sin embargo, resulta en grandes cantidades de residuos, ya que cerca del 60 - 70 % del peso total de la fruta está representado por la cáscara y las semillas. Estos residuos pueden ser aprovechados industrialmente, teniendo en cuenta el alto contenido de pectina de la cáscara y de aceite en las semillas. Las semillas de maracuyá son de interés farmacológico e interés nutricional por ser ricas en ácidos grasos poliinsaturados como ω -3 y ω -6 y las cáscaras son de interés en el sector alimenticio debido a su alto contenido de pectina por ser un agente gelificante. (del Puerto & Maldonado, 2022)

1.7.2. Taxonomía

Tabla I-4 Taxonomía de maracuyá (*Passiflora edulis flavicarpa*)

Reino:	Vegetal
Phylum:	Telemophytae
División:	Tracheophytae
Sub-división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub-clase:	Dicotyledoneae
Orden:	Parietales
Familia:	Passifloraceae
Género:	Passiflora
Especie:	Edulis
Nombre científico	Passiflora edulis Sims
Nombre común	Maracuyá
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Ordenes	Corolinos

Fuente: Herbario Universitario T.B., 2024

1.7.3. Composición química

La composición típica de la fruta de maracuyá es la siguiente: cáscara 50 - 60 %, el jugo 30 – 40 %, semillas 10 – 15 %, siendo el jugo el producto de mayor importancia. Una fruta de maracuyá tiene en promedio un valor energético de 78 cal, 2,4 g de hidratos de carbono, 5 mg de calcio, 17 mg de fósforo, 0,3 mg de hierro, 684 mg de vitamina A, 0,1 mg de vitamina B2 (Riboflavina), 2,24 mg de Niacina y 20 mg de vitamina C. En cuanto a la semilla se puede decir que estas son de color negro, forma de corazón, superficie rugosa, cubiertas con un arilo carnoso y muy aromático. (Cruz & Melendez, 2004)

1.7.4. Variedades del maracuyá

El género *Passiflora*, al que pertenece el maracuyá, tiene una gran biodiversidad con aproximadamente 520 especies. Sin embargo, la producción comercial de maracuyá se basa en especies limitadas y más específicamente:

1.7.4.1. Maracuyá variedad morada

Figura 1-5 Maracuyá morada (*Passiflora edulis*)



Fuente: Wikipedia, 2023

Pulpa

En el caso de la variedad morada, dos Reis et al. (2018), en su investigación encontraron que la pulpa contiene $6,53 \pm 0,23$ % de proteína. Por su parte, Ramaiya et al. (2019), reportaron $1,18 \pm 0,11$ % de ceniza, $6,95 \pm 0,73$ % de carbohidratos, $12,7 \pm 0,3$ % de humedad y $1,09 \pm 0,04$ % de lípidos.

Los jugos extraídos de la pulpa de *Passiflora edulis* son una rica fuente de fibra, proteína y carbohidratos. Una taza de 247 ml de jugo de fruta de *Passiflora edulis* proporciona aproximadamente un 24 % de potasio, entre el 60 y 80 % de magnesio, más del 80 % de fósforo y el 90 % de hierro recomendado en la dieta en términos de minerales (Ramaiya et al., 2019). El fósforo es el mineral más abundante en la pulpa del maracuyá morado con 265,45 mg, seguido del potasio (100,22 mg), el sodio (13,15 mg), el calcio (10,83 mg) y el hierro (1,22 mg). (Granados et al., 2017)

Cáscara

Según el análisis proximal de la cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*) realizado por “Klinchongkon et al. 2015” (como se citó en Campos et al., 2023) , destacan que los carbohidratos constituyen el $79,44 \pm 0,22$ %, mientras que la humedad es del $9,43 \pm 0,05$ %, la grasa bruta del $0,36 \pm 0,04$ %, la proteína bruta del $3,87 \pm 0,23$ % y la ceniza del $6,91 \pm 0,07$ %.

Además, se estudió el uso de la cáscara de maracuyá como fibra dietética, y se informó que el rendimiento de material insoluble en alcohol de la cáscara seca fue de aproximadamente el 82,4 %, de los cuales el 81,9 % correspondió al componente de fibra dietética, siendo la celulosa el componente principal. Varios estudios han reportado que la cáscara de maracuyá contiene alrededor del 15 al 20 % de pectina. (Seixas et al., 2014)

Semilla

Según Ramaiya et al. (2018) como se citó en Campos et al. (2023), se centró en la composición aproximada y el contenido mineral de las semillas comestibles de *Passiflora edulis*, donde se encontró que el contenido de humedad era del $9,18 \pm 0,34$ %, mientras que el contenido de ceniza era del $1,35 \pm 0,01$ %. Las semillas presentaban un mayor contenido de proteína ($12,71 \pm 0,10$ %) y de fibra dietética total ($43,76 \pm 0,64$ %), con una fracción mayoritaria de fibra dietética insoluble del 72 al 74 % y una fracción de fibra dietética soluble del $12,31 \pm 0,08$ %. El contenido de lípidos era del $29,65 \pm 0,41$ %, lo que indica que la semilla es rica en contenido de aceite. (Campos et al., 2023)

1.7.4.2. Maracuyá variedad amarilla

Figura 1-6 Maracuyá amarillo (*Passiflora edulis flavicarpa*)



Fuente: Wikipedia, 2023

Pulpa

El maracuyá crudo está compuesto por un 73 % de agua, un 22 % de carbohidratos, un 2 % de proteína y un 0,7 % de grasa (Barbosa et al., 2021). Este fruto se caracteriza por ser un alimento de alta acidez, con un pH de $3,10 \pm 0,054$ y una acidez de $3,48 \pm 0,069$ %, debido al predominio de dos ácidos, el cítrico y el málico. Además, contiene $12,43 \pm 0,15$ °Brix de sólidos solubles. (Garcia et al., 2015)

Se han informado diferentes valores de vitamina C en el maracuyá. Por ejemplo, Pertuzatti et al. (2015), reportaron 41 mg de vitamina C en 100 g de jugo de maracuyá natural, mientras que Malaterre et al. (2016) reportaron 44,4 mg/100 g de vitamina C. También hay valores más bajos, como los reportados por Prasertsri et al. (2019), con 16-20 mg/g de vitamina C. Además, la pulpa del maracuyá presenta 2,46 mg/100 g de niacina y 0,131 mg/100 g de Riboflavina. En cuanto a los minerales, el potasio es el más abundante en la pulpa del maracuyá con 2176,9 mg/100 g, seguido del magnesio (76,8 mg/100 g), sodio (75,3 mg/100 g), calcio (47,1 mg/100 g) y hierro (7,1 mg/100 g). (Morais et al., 2017)

La pulpa del maracuyá por su sabor dulce y aromático, se emplea para la preparación de jugos, refrescos, mermeladas, néctares, jarabes, jaleas, cócteles y helados, entre otros.

En el presente trabajo, la pulpa de maracuyá del proceso se puede aprovechar para producir jugo concentrado o vender a diferentes empresas que produzcan este producto y/o venderlo a restaurantes que elaboran jugos o pasteles de maracuyá a base de pulpa. Como, por ejemplo:

1. VidaFrut industria que se dedica a la producción de jugos artesanales en Tarija, utilizando frutas naturales de calidad. Elaborando jugos de maracuyá, limón, pelón y lima.
2. Pulpa Frut Tarija industria que se dedica a la elaboración de pulpa de fruta congelada, con todas sus propiedades naturales. Manejando sabores de maracuyá, coco, acerola, frutilla y limón.

3. Sanilac Lácteos dedicada a producir deliciosos jugos entre otros productos. Sanilac FRULAC, en todos sus sabores: frutilla, naranja, mandarina, durazno, maracuyá, piña, limón y coco.

La pulpa también se puede emplear para hacer bicarbonatos saborizados que son un producto complementario a la hoja de coca en su estado natural. Bicarbonatos saborizados JUST Tarija cuenta con bicarbonatos saborizados de: Menta, stevia, limón, maracuyá, café y eucalipto.

Cáscara

La cáscara del maracuyá es rica en vitaminas, minerales y fibra dietética, especialmente fibras solubles, que proporcionan beneficios como el control glucémico y la prevención de enfermedades cardiovasculares. El análisis proximal de la cáscara indica que contiene una fibra dietaria total de 63,40 %, carbohidratos de 23,41 %, ceniza de 7,50 %, proteínas de 4,82 % y grasas de 0,87 %. (Duarte et al., 2016)

Semilla

Las semillas están compuestas de $7,38 \pm 0,07$ % de humedad, $1,27 \pm 0,02$ % ceniza, $30,39 \pm 0,04$ % de lípidos y 48,73 % de carbohidrato y fibra. (Campos et al., 2023)

Tabla I-5 Composición proximal del maracuyá variedad amarilla (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) (g/100 g de peso seco)

Composición	Pulpa		Cáscara		Semilla	
	USDA (2019)	Adeyayo & Aremu (2017)	Dos Reis et al. (2018)	Adeyayo & Aremu (2017)	Dos Reis et al. (2018)	Liu et al. (2008)
Energía (kcal)	60	*	*	*	*	398,04
Humedad	84,21	87,50	87,14	29,5	57,09	10,0
Carbohidratos	14,45	11,9	65,78	66,2	71,07	36,06
Proteínas	0,67	0,23	3,40	0,703	13,07	10,8
Lípidos	0,18	*	4,20	0,805	12,31	23,4
Fibra	0,2	*	61,16	*	65,60	17,48
Cenizas	*	0,34	6,62	0,898	3,56	1,46
Minerales (mg/100g)						
Zinc (Zn)	0,06	0,10	1,00	0,130	4,30	0,055
Hierro (Fe)	0,36	2,42	3,20	3,18	5,20	0,2
Manganeso (Mn)	*	0,22	0,50	0,235	2,20	*
Fósforo (P)	25	26,6	140	13,9	310	125
Sodio (Na)	6	22,6	2,20	22,3	3,46	2,98
Magnesio (Mg)	17	0,73	120	0,580	150	1,54
Potasio (K)	278	24,7	2600	25,5	760	0,85
Calcio (Ca)	4	10,4	250	11,0	30,00	0,54

Fuente: Campos et al., 2023

1.8. Descripción de las alternativas del proceso

El proceso de extracción de la pectina puede tener un impacto en sus propiedades, especialmente en el peso molecular. Investigaciones anteriores han demostrado que las extracciones a temperatura ambiente producen pectinas con un alto peso molecular, pero con un rendimiento reducido.

Existen diferentes técnicas para la extracción de pectina a partir de tejidos vegetales, en las cuales pueden utilizarse procedimientos físico-químicos o enzimáticos. A escala industrial el más utilizado es la hidrólisis ácida.

1.8.1. Extracción de pectina por hidrólisis ácida convencional

La extracción de pectina por métodos convencionales se lleva a cabo a temperaturas cercanas a los 90 °C por al menos una hora. Las pectinas se extraen y separan de los desechos de diversos frutos mediante acidificación. Comercialmente usando ácidos como el cítrico, clorhídrico, fosfórico, nítrico o sulfúrico, se obtienen pectinas a altas temperaturas para hidrolizar la pectina. Después de concentrarlas, se precipita la pectina con la adición de alcohol, se seca, se granula y por último se tamiza. La extracción en soluciones acuosas ácidas no sensibles al calcio es apta para obtener pectinas. Y para obtener la pectina restante, cuando son sensibles al calcio, se realiza otra extracción con ácidos fuertes. También puede darse la extracción con soluciones neutras o básicas, pero no se conoce con certeza la concentración ideal con alcohol para su precipitación. (Aza & Méndez, 2011)

1.8.2. Extracción de pectina por hidrólisis ácida asistida por microondas

La extracción de pectina por hidrólisis ácida asistida por microondas (EAM) es una técnica respetuosa con el medio ambiente y utiliza el disolvente polar para absorber la energía de microondas encerrada en un campo electromagnético. La radiación de microondas calienta el disolvente polar muy rápidamente para que el proceso de extracción requiera menos tiempo. Esto hace que el proceso sea más eficiente en comparación con los métodos de calentamiento tradicionales. Se ha informado que la despolimerización de pectina que se produce durante el proceso de extracción ácida

puede reducirse mediante la técnica EAM. Además, la energía de la irradiación de microondas puede mejorar la lisis celular a través de una presión interna aumentada dentro de las células de la muestra de la planta y un aumento abrupto de la temperatura, que desintegra la superficie de la muestra y, como resultado, la pectina exuda de las células de la planta hacia el solvente. (Maran et al., 2013)

1.8.3. Extracción enzimática de pectina

Es un método de extracción fisicoquímica de pectina. El método enzimático emplea pectinesterasa o pectinmetilesterasa, la cual convierte a las pectinas de alto metoxilo en pectinas de bajo metoxilo sin la despolimerización de la molécula de pectina. Los geles obtenidos por vía enzimática eran más resistentes. (Cabarcas et al., 2012)

La degradación enzimática de cáscaras de frutas se realiza bajo las siguientes condiciones:

Se ponen 80 ml de amortiguador ácido cítrico-citrato de sodio, pH 4,5 en un reactor enchaquetado de mezclado ideal a 40 °C. Luego se agregan 5 microlitro de enzima altamente purificada y posteriormente se agregan 2 g de cáscara. La reacción se debe mantener bajo agitación constante durante 12 h. Al término de la reacción la suspensión se filtra a través de tela muselina. La cáscara que no contiene la pectina es lavada con agua y deshidratada con solventes orgánicos. La pectina contenida en el jugo péctico se precipita con dos volúmenes de etanol y se separa por filtración. (Galeas, 2015)

1.8.4. Extracción de pectina con agua subcrítica

La extracción con agua subcrítica implica el uso de agua a mayor presión alcanzando una temperatura superior a su temperatura de ebullición normal sin sufrir ninguna alteración de fase. Cuando se utiliza dicho disolvente en la extracción, el proceso se denomina extracción con agua subcrítica (SWE), que también se conoce como extracción con agua caliente a presión y extracción con agua sobrecalentada. Por lo tanto, este principio se ha aplicado en los campos alimentario y medioambiental con muchos otros nombres diferentes. El aumento de la temperatura del agua para la

extracción tiene muchas ventajas como baja viscosidad, baja tensión superficial, mayor tasa de transferencia de masa y alta difusión. También puede ayudar a extraer compuestos iónicos y no iónicos, ya que la constante dieléctrica del agua se reduce de 79 a 25 °C a 33 a 200 °C. Estudios recientes han demostrado trabajos sobre procesos SWE para pectina de muchas plantas diferentes. “Ueno et al.” (como se citó Sharma et al., 2022), han mostrado la comparación entre SWE y el método de extracción ácida convencional para aislar pectina de la parte flavedo de *Citrus junos*. Los autores observaron que el agua subcrítica a una temperatura de 160 °C aumenta rápidamente la tasa de extracción. Esto se puede explicar porque el disolvente a alta temperatura con bajo punto dieléctrico ayuda a mejorar la solubilidad de la pectina en agua. Un estudio publicado mostró un menor rendimiento de pectina a temperaturas superiores a 80 °C debido a la degradación de la pectina. “Chen et al.” (como se citó Sharma et al., 2022), demostraron en su estudio que el agua subcrítica ayuda a aumentar la transferencia de masa y la temperatura óptima puede ser útil para eludir el paso de hidrólisis ácida en la extracción ácida convencional. Este método ecológico ofrece muchos beneficios, como un proceso de extracción rápido, exclusión de disolventes y extractos de mayor calidad. Generalmente, el agua subcrítica como solvente se considera segura y hace que este método sea apropiado para compuestos alimentarios y farmacéuticos como la pectina. (Sharma et al., 2022)

1.9. Caracterización del producto

Según el Codex Alimentarius, la pectina está calificada como aditivo alimentario autorizado y seguro, que no presenta peligro alguno al ser consumida por los seres humanos.

Los aditivos alimentarios como la pectina son sustancias no consumidas de forma regular ni directa por las personas, no constituyen un componente esencial en la elaboración de alimentos y pueden o no presentar características nutricionales; su adición en productos alimenticios se realiza para mejorar sus propiedades organolépticas. (Norma Codex Stan 192-1995, pág.3). (ver Anexo 4)

Por otra parte, el Código Alimentario Argentino nos indica la descripción y algunas características de la pectina mediante la **Res. 1782, 3.8.83**.

Los parámetros fisicoquímicos de las pectinas comerciales como se indica en la tabla I-6 están establecidos por las distintas organizaciones las cuales son: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Códice de Sustancias Químicas para Alimentos (FCC) y el Consejo Ambiental de Exportación (ECC).

Tabla I-6 Caracterización de pectina estándar

Componente	Especificación (pectina estándar)	Unidad
Grado de esterificación	74,71 ± 3,32	%
pH	2,8 – 3,60	-
Humedad	8,51 ± 1,96	% masa
Cenizas	3,77 ± 3,39	% masa
Contenido de azúcar	55 – 85	% masa
Peso equivalente	1775,46 ± 1143,78	mg/meq
Ácido galacturónico	68,29 ± 1339	%
Contenido de metoxilo	6,93 ± 3,22	%
Acidez libre	0,78 ± 0,46	meq/g
Hierro	9,50	mg/100 g
Calcio	1034,42	mg/100 g
Bacteriológico	-	-
Cuenta de hongos y levaduras (25 °C)	Menos de 10/g	-
Recuento total en placa	Menos de 500/g	-
Escherichia coli	Prueba negativa	-
Salmonella	Prueba negativa	-
Estafilococos	Prueba negativa	-

Fuente: Barreto et al., 2017

1.10. Propiedades físicas y químicas de la pectina

Debido a la influencia de factores como el tipo de materia prima, período de crecimiento, período de cosecha, tiempo de almacenamiento y método de extracción, la composición y propiedades físicas y químicas de la pectina son muy diferentes, por lo que la medición de las propiedades físicas y químicas de la pectina es importante

para la caracterización y análisis de la pectina y el juicio de calidad es de gran importancia. Las propiedades físicas y químicas de la pectina incluyen principalmente solubilidad, grado de esterificación (GE), contenido de Gal-A (ácido galacturónico), composición de monosacáridos, peso molecular relativo (Mw), reología y coagulación. Los tres parámetros más importantes para evaluar la calidad de la pectina son GE, grado de gelificación y contenido de Gal-A. (Zibó alquimista Biotecnología compañía Ltda., 2023)

1.10.1. Solubilidad

Según la solubilidad de la pectina, se divide en pectina soluble en agua y pectina insoluble en agua. La solubilidad de la pectina está relacionada con el grado de polimerización de la pectina y el contenido y distribución de sus grupos metoxi. Aunque el pH, la temperatura y la concentración de la solución de pectina también tienen un cierto impacto en la solubilidad de la pectina, en términos generales, cuanto menor sea el peso molecular relativo de la pectina y mayor sea el grado de esterificación, mejor será su solubilidad. Al igual que los coloides hidrófilos, las partículas de pectina primero se hinchan y luego se disuelven. Si las partículas de pectina no están bien separadas cuando se dispersan en agua, las partículas hinchadas se aglomerarán entre sí en trozos grandes que son difíciles de disolver una vez formados.

1.10.2. Grado de esterificación

La pectina es un tipo de polisacárido del ácido poligalacturónico y sus residuos de ácido galacturónico suelen estar esterificados por algunos grupos, como grupos metoxi, grupos amida, etc. El grado de esterificación (GE), también conocido como metoxilación, se refiere a la suma de las proporciones de esterificación metílica, acetilación y amidación en la pectina. Según la diferencia en el grado de esterificación de la pectina y el tipo de esterificación, la pectina se puede dividir en tres categorías: pectina con alto contenido de éster (GE > 50 %), pectina con bajo contenido de éster (GE < 50 %), pectina amidada (grado de amida > 25 %). El grado

de esterificación de la pectina suele variar debido a la diversidad de materias primas y procesos de extracción.

El GE de la pectina es un parámetro muy importante.

El tamaño y el GE afectan la solubilidad, la gelificación y la estabilidad de la emulsión de los productos de pectina. Sin considerar otros factores, cuanto mayor sea el grado de esterificación y de amidación de la pectina, mejor será su solubilidad en agua.

Por ejemplo, actualmente se cree generalmente que el grado de esterificación de MCP con actividad anticancerígena debe ser inferior al 10 %.

La pectina, su GE generalmente se determina mediante titulación. Este método es relativamente simple y fácil de implementar, pero consume una gran cantidad de muestra y tiene pasos engorrosos. Además, están la espectroscopia Raman, el método infrarrojo, la espectroscopia de resonancia magnética nuclear y la cromatografía líquida de alta resolución, etc. Entre ellos, el método infrarrojo requiere una pequeña cantidad de muestra y no destruye la muestra. Es simple y rápido, pero el error de resultado es grande.

El resultado de medición más preciso es la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN), pero este método requiere muestras de alta pureza. Debido que para un análisis cuantitativo para la determinación de la identidad y pureza de la pectina (Gal-A), es necesario que la muestra esté libre de impurezas, ya que la presencia de otros compuestos dificulta la integración de las señales y, por lo tanto, la cuantificación del analito de interés.

La espectroscopia por resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica analítica utilizada para determinar la estructura molecular y la composición química de una muestra.

1.10.3. Composición y contenido de monosacáridos

La pectina es un tipo de heteropolisacárido compuesto principalmente de ácido poligalacturónico. El contenido de Gal-A (ácido galacturónico) en la pectina comercial es ≥ 65 %. En muchas publicaciones, la pureza de la pectina suele expresarse mediante el contenido de Gal-A. Para determinar el contenido de Gal-A se utilizan principalmente el método del sulfato de carbazol y el método del m-hidroxibifenilo. La medición por cromatografía iónica es más precisa. Además, existen métodos gravimétricos, titulación con pectato de calcio y titulación por destilación. La composición de los monosacáridos de pectina de diferentes materias primas varía mucho. (Zibó alquimista Biotecnología compañía Ltda., 2023)

La composición de los monosacáridos puede reflejar indirectamente la estructura de la pectina. La mayoría de los azúcares neutros de la pectina se encuentran en sus cadenas laterales.

1.10.4. Propiedades del gel

El grado de gelificación es uno de los principales indicadores para medir la calidad de la pectina. Se refiere a la capacidad de cada parte de la pectina de combinarse con muchas partes de sólidos (generalmente sacarosa y glucosa) para formar gel con cierta dureza y calidad bajo ciertas condiciones, es decir, una medida de la capacidad de la pectina para formar geles.

El grado de gelificación es un parámetro importante para juzgar la calidad de la pectina en la industria. El método US-SAG y el método de trituración por presión se utilizan principalmente para medir el grado de gelificación de la pectina. Requisitos de grado de gelificación de la pectina comercial (US-SAG): pectina con alto contenido de éster (150 ± 5 °SAG) y pectina con bajo contenido de éster (100 ± 5 °SAG). Aunque la pectina se encuentra comúnmente en todas las plantas superiores, y muchos científicos también han intentado utilizar materias primas como batatas y girasoles para la producción comercial, las materias primas utilizadas por los fabricantes de pectina nacionales y extranjeros para producir pectina son el orujo de

cáscara de cítricos y la cáscara de manzana. Una de las razones clave es que el grado de gelificación de la pectina preparada a partir de otras materias primas no puede cumplir con los requisitos comerciales.

1.10.5. Masa molecular

La masa molecular de la pectina juega un papel fundamental en la determinación de sus propiedades funcionales, como la gelificación, la viscosidad y la capacidad de retención de agua. La determinación cuidadosa del peso molecular es difícil, parcialmente debido a la extrema heterogeneidad de las muestras y a la tendencia de las pectinas a agregarse, aún bajo condiciones no favorables a la gelación. (Cabarcas et al., 2012)

La masa molecular de la pectina está relacionada con la longitud de la cadena, es una característica muy importante de la que dependen la viscosidad de sus disoluciones y su comportamiento en la gelificación de las jaleas.

La masa molecular de las pectinas varía de acuerdo a la materia prima, condiciones de extracción y procedimientos de purificación. En base a viscosimetría, el peso molecular de las pectinas comerciales normalmente se encuentra dentro del rango de 50 000 a 150 000 Dalton. (Gómez et al., 2001)

1.10.6. Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de la pectina son cuestiones extremadamente importantes en el proceso de aplicación de la pectina. Las soluciones de pectina tienen una viscosidad más baja en comparación con otras gomas vegetales. Las características de flujo de la solución de pectina diluida son similares al fluido newtoniano, mientras que la solución de pectina de alta concentración (1 %) tiene algunos fenómenos y características de fluido pseudoplástico.

Al igual que otras dispersiones de biopolímeros, la relación entre la viscosidad intrínseca y la velocidad de corte en una solución de pectina de alta concentración muestra tres etapas: (1) se comporta como un fluido newtoniano a 0 velocidad de corte y la viscosidad es constante; (2) Al llegar a un cierto punto de baja velocidad de

cizallamiento, en un intervalo $0 < \dot{\gamma} < 100$ (1/s) de la solución comienza a mostrar el fenómeno de adelgazamiento por cizallamiento y la viscosidad disminuye con la potencia; (3) $\dot{\gamma} > 1000$ (1/s) a alta velocidad de cizallamiento, en un intervalo de $\dot{\gamma} > 1000$ (1/s) la viscosidad de la solución alcanza un límite y una viscosidad constante de cizallamiento infinito. (Muñoz, 2016)

Actualmente se considera que la razón de este fenómeno es que la velocidad de cizallamiento cambia la conformación de la pectina, y la conformación de las moléculas de pectina se reorganiza a diferentes velocidades de cizallamiento. En la segunda etapa, la velocidad de cizallamiento es muy baja, la reorganización de las cadenas de polímeros es menor y la viscosidad cambia poco; En la tercera etapa bajo la alta velocidad de cizallamiento, debido a que la velocidad de cizallamiento es demasiado rápida, la conformación molecular de la pectina no tiene tiempo para reorganizarse y la viscosidad es infinitamente cercana a una constante.

Hay muchos factores que afectan la viscosidad de la solución de pectina. Además de las características estructurales de la pectina (Mw, GE, etc.), también se ve afectada por condiciones externas, como el estado del sistema de solución (concentración, temperatura, pH, contenido de sales y sólidos, etc.) y algunos factores físicos (agitación, cizallamiento externo, etc.). La reología de la solución de pectina determina directamente la calidad del producto y el diseño de la tecnología de procesamiento de alimentos. (Zibó alquimista Biotecnología compañía Ltda., 2023)

1.11. Método de análisis de la pectina extraída de la cáscara de maracuyá

1.11.1. Determinación del peso equivalente

Aplicando el método de valoración ácido-base, se determina el peso equivalente de la pectina, al relacionar los miligramos del componente ácido (pectina) y los miliequivalentes de NaOH gastados en la valoración, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{mg componente ácido}}{\text{meq NaOH}} \quad \text{Ec.(1-1)}$$

1.11.2. Determinación de acidez libre

La acidez libre se determina aplicando la relación de los meq de NaOH consumidos (que representan los carboxilos libres presentes en el componente ácido) y el peso de la pectina en g, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Acidez\ libre = \frac{meq\ NaOH}{g\ componente\ ácido} \quad \mathbf{Ec.(1-2)}$$

1.11.3. Determinación del porcentaje de metoxilo

Las moléculas de ácido D-galacturónico presentan grupos metoxilo, la cantidad de estos grupos funcionales permiten evaluar la facilidad de la pectina para formar, y así clasificarla como PBM, o de PAM, además de determinar la sensibilidad de la pectina a la presencia de cationes polivalentes.

Este indicador, corresponde al número de grupos metoxilo que se encuentran los grupos carboxílicos. El método para determinarlo se basa en la neutralización de los grupos carboxílicos con NaOH 0,1 N en presencia de fenolftaleína, agregando exceso medido de NaOH 0,25 N, para saponificar los grupos $-COOCH_3$ que pasan a $-COONa$ y finalmente se titula el exceso de NaOH. (Benitez, 2022). El porcentaje de metoxilo se determina partiendo de la solución de la valoración del peso equivalente, la que se coloca en un matraz con tapa esmerilada y se le adiciona 25 ml de NaOH 0,25 N y se agita fuertemente a temperatura ambiente, se deja en reposo unos 30 min, luego se le agrega 25 ml de HCl 0,25 N y se titula el exceso de HCl con NaOH 0,1 N. El porcentaje de metoxilo, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Metoxilo} = \frac{meq\ B \cdot 31 \cdot 100}{mg\ componente\ ácido} \quad \mathbf{Ec.(1-3)}$$

Donde 31 es el peso molecular del metoxilo ($-O-CH_3$) expresado en mg/meq y meq B son los meq de NaOH gastados en la determinación del contenido de metoxilo.

1.11.4. Determinación del grado de esterificación (GE)

El GE relaciona los carboxilos de urónicos esterificados y los carboxilos totales de urónicos el cual se obtiene:

$$\% GE = \frac{meq B}{(meq A + meq B)} \cdot 100 \quad \text{Ec.(1-4)}$$

Donde los meq A equivalen a los miliequivalentes de NaOH gastados en la de la acidez libre y meq B son los miliequivalentes de NaOH gastados en la determinación del contenido de metoxilo. (Benitez, 2022)

1.11.5. Determinación del porcentaje de ácido anhídrido galacturónico (AAG)

El porcentaje de AAG, permite conocer el grado de pureza de la sustancia péctica, debido a que la pectina es un polisacárido constituido no solo por ácido D-galacturónico, sino también en su estructura el 10 % o más de la cadena pueden representar otros azúcares, como arabinosa, glucosa y ramnosa. Su determinación se fundamenta en el método de valoración descrito para la determinación de la acidez libre y porcentaje de metoxilo (Benitez, 2022), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% AAG = \frac{meq B \cdot 31 \cdot mg \text{ pectina}}{176 \cdot 100 \cdot (meq A + meq B)} \cdot 100 \quad \text{Ec.(1-5)}$$

Donde:

176: es el peso molecular del ácido anhídrido galacturónico (AAG) expresado en mg/meq.

31: es el peso molecular del metoxilo (-O-CH₃) expresado en mg/meq.

1.11.6. Grado de gelificación

Expresa la cantidad de azúcar (sacarosa) que gelificará una parte de pectina para obtener una firmeza dada bajo condiciones establecidas de pH = 3,2 – 3,5; de 65 a 70 °Brix y pectina dentro de los límites de 0,2 a 1,5 %.

Para esta prueba, se prepara una escala entre 0,4 y 1,4 g de pectina, éstas se incluyen a vasos de precipitación de 200 ml de capacidad, luego se lleva a ebullición hasta la disolución completa de la pectina, luego se agrega 100 g de sacarosa, se diluye

completamente y se agrega agua hasta peso de 150 g, finalmente se adiciona ácido cítrico hasta obtener el pH adecuado (3,2 – 3,5), estos geles se dejan reposar por 24 h y luego se procede a desmoldar evaluándose las características de cada uno de ellos en forma visual para calcular el grado de gelificación. (Benitez, 2022). Se elige el gel que presenta las características más apropiadas y se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Grado de Gelificación} = \frac{\text{g de sacarosa}}{\text{g de pectina}} \quad \text{Ec.(1-6)}$$

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Metodología de estudio

2.1.1. Metodología documental

Se llevó a cabo una metodología documental que se basa en el análisis y la interpretación de documentos escritos, gráficos, audiovisuales y otros tipos de registros. Este método se utiliza para recopilar información, revisar literatura existente, analizar fuentes primarias y secundarias, y extraer conclusiones a partir de la documentación disponible. Consiste en la recopilación, selección, análisis y presentación de información coherente a partir de diversos documentos. Estos documentos incluyeron revistas científicas, sitios web, tesis y otros recursos relevantes. El objetivo fue obtener información precisa y fundamentada sobre proyectos similares relacionados con la extracción y caracterización de la pectina y así tener un soporte científico.

2.1.2. Metodología cualitativa

En este proyecto, se utilizó metodología cualitativa para comprender los procesos, eventos, estructura y empleo de procedimientos relacionados con la extracción experimental de pectina a partir de la cáscara de maracuyá. Esta metodología nos permitirá obtener información detallada y contextualizada sobre el tema de estudio. Es especialmente útil cuando se busca explorar fenómenos sociales en profundidad, comprender significados y perspectivas, y generar teorías desde los datos recopilados en el terreno.

2.1.3. Metodología cuantitativa

La metodología cuantitativa se utilizó para recopilar, analizar y presentar datos numéricos con el objetivo de entender y optimizar procesos químicos y sistemas relacionados. Es esencial para la toma de decisiones informadas, la mejora continua de los procesos y la optimización de la eficiencia y la calidad en la producción de productos químicos. La aplicación de métodos estadísticos y herramientas de análisis cuantitativo contribuye significativamente al avance y la innovación en esta disciplina.

2.2. Selección del proceso a utilizar

De acuerdo a referencias bibliográficas la extracción experimental de pectina se puede llevar a cabo por diferentes métodos de extracción. Las ventajas y desventajas de los cuatro procesos de extracción de pectina que se tomaron en cuenta, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla II-1 Ventajas y desventajas

Proceso	Ventajas	Desventajas
Hidrólisis ácida convencional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad del equipo para la etapa de hidrólisis. ▪ Proceso ampliamente utilizado por varios autores. ▪ Costo bajo de inversión inicial debido a los equipos disponibles. ▪ Disponibilidad de reactivos y materiales necesarios (HCl y C₂H₅OH al 96 %). ▪ No genera desechos peligrosos para el medio ambiente y pueden ser reutilizables. ▪ Buen rendimiento del proceso de extracción. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiempo moderado de hidrólisis. ▪ Consumo moderado de energía por el uso de calentador y agitador magnético.
Hidrólisis enzimática	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia en la extracción. ▪ Conservación de propiedades funcionales. ▪ Menor impacto ambiental por uso de enzimas. ▪ Mayor calidad de pectina. (contenido de ácido galacturónico) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costos altos de enzimas (Bs. 350) ▪ Tiempo de proceso prolongado (12 h) ▪ Mayor consumo energético debido al tiempo de procesos de extracción. ▪ Menor rendimiento que otros procesos de extracción.
Hidrólisis ácida asistida por microondas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor tiempo de hidrólisis. ▪ Menor consumo de energía. ▪ Disponibilidad de reactivos necesarios. ▪ No genera desechos peligrosos. ▪ Buen rendimiento del proceso de extracción. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falta de equipo principal (microondas). ▪ Acondicionamiento del microondas. ▪ Costo alto de inversión inicial ▪ Posible degradación del producto por las ondas electromagnéticas. ▪ Método poco utilizado. ▪ Falta de materiales necesarios (agitador, balón de destilación, condensador).

Extracción de pectina con Agua Subcrítica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A una temperatura de 160 °C aumenta rápidamente la tasa de extracción. ▪ Evita el uso de solventes, lo que disminuye problemas ambientales. ▪ Extractos de mayor calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falta de equipos para el condicionamiento del agua. ▪ Degradación de pectina a temperaturas y tiempos de extracción muy prolongadas. ▪ Requiere un mayor consumo energético debido a altas temperaturas de operación.
--	---	---

Fuente: Elaboración propia, 2023

Para la selección y calificación de los procesos seleccionados solo se tomó en cuenta dos de ellos debido a que se cuentan con los equipos y materiales necesarios en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

Para la correcta selección del proceso a utilizar para la extracción experimental de pectina de cáscara de maracuyá se efectuó mediante la realización del método de los factores ponderados. Este método realiza un análisis cuantitativo en el que se compara las diferentes alternativas, asignando un peso relativo a cada factor fundamental del proceso que refleje su importancia relativa fijando una escala de calificación.

Tabla II-2 Escala de calificación del 1 al 10

Escala de calificación	Calificación
Excelente	9-10
Muy bueno	7-8
Bueno	5-6
Regular	3-4
Malo	1-2

Fuente: Elaboración propia, 2023

Para la determinación de la ponderación de los factores considerados se tomó en cuenta mediante la revisión de literatura de diferentes trabajos de investigación en el cual debe reflejar la importancia relativa de cada factor en el contexto del presente proyecto.

Tabla II-3 Ponderación de los factores considerados para la extracción de pectina mediante hidrólisis ácida convencional y enzimática

N°	Factor evaluado	Peso relativo (%)	Ponderación	Comentario
1	Aplicabilidad del proceso	0,35	35	La extracción por hidrólisis enzimática se obtiene un producto de buena calidad. Sin embargo, el tiempo de extracción por hidrólisis enzimática es mayor a la extracción por hidrólisis ácida convencional, el cual se obtiene un mayor rendimiento.
2	Generación de subproductos	0,10	10	En ambos procesos se utiliza la cáscara de maracuyá para darle un valor agregado mediante la extracción de pectina.
3	Costo de inversión inicial	0,30	30	La hidrólisis ácida es generalmente más rápida y menos costosa en términos de reactivos. La hidrólisis enzimática puede ser más costosa debido al costo de las enzimas y al tiempo de proceso adicional.
4	Requerimiento energético	0,05	5	La hidrólisis ácida convencional a menudo implica el calentamiento de una solución ácida, lo que requiere energía para mantener la temperatura adecuada para la extracción de la pectina. La hidrólisis enzimática generalmente se lleva a cabo a temperaturas más moderadas, pero requiere un tiempo prolongado de extracción de 12 h lo cual demanda un mayor consumo energético.
5	Procesos ampliamente probados	0,05	5	Ambos procesos son altamente probados y tienen aplicaciones establecidas en la industria.
6	Confiabilidad del proceso	0,1	10	Ambos métodos han demostrado ser confiables en la obtención de pectina según bibliografía.
7	Impacto ambiental	0,05	5	En ambos procesos no se generan residuos sólidos significativos, no se producen ruidos fuertes ni malos olores. La hidrólisis enzimática es un proceso más amigable con el medio ambiente debido al uso de enzimas respecto al hidrólisis ácida.

Fuente: Elaboración propia, 2023

2.2.1. Calificación de los métodos para la extracción experimental de pectina

Tabla II-4 Matriz de decisión de los métodos para la extracción de pectina

Factores	Peso relativo (%)	Nota Hidrólisis ácida convencional	Ponderación Hidrólisis ácida convencional	Nota Hidrólisis Enzimática	Ponderación Hidrólisis Enzimática
Aplicabilidad del proceso	0,35	8	2,8	7	2,45
Generación de subproductos	0,10	7	0,7	7	0,7
Costo de inversión inicial	0,30	8	2,4	5	1,5
Requerimiento energético	0,05	5	0,25	6	0,3
Procesos ampliamente probados	0,05	7	0,35	7	0,35
Confiabilidad del proceso	0,10	8	0,8	8	0,8
Impacto ambiental	0,05	7	0,35	9	0,45
Puntuación final		Total	7,65	Total	6,55

Fuente: Elaboración propia, 2023

La calificación global para cada alternativa se calculó como la suma de las puntuaciones para cada factor ponderado según su peso relativo.

Según resultados de la tabla II-4 presentada se observa que el mejor proceso para la extracción experimental de pectina de cáscara de maracuyá es el método por hidrólisis ácida convencional con una puntuación de 7,65 puntos.

Entonces se realizó la extracción de pectina por el método de hidrólisis ácida convencional, además de contar con bastante información sobre este proceso de extracción, es un método ampliamente probado con resultados efectivos y rendimientos aceptables, y se cuenta con las condiciones, equipos y materiales necesarios para la extracción de pectina en el LOU.

2.3. Selección de variables del proceso experimental

La extracción de pectina es un proceso altamente influenciado por el pH, temperatura y tiempo de hidrólisis. Estas variables son fundamentales para el éxito del proceso y deben ser cuidadosamente controladas y ajustadas para obtener un rendimiento óptimo de pectina.

Estas variables están interrelacionadas y su selección y ajuste deben ser meticulosos para obtener los mejores resultados. Es crucial llevar a cabo un diseño experimental que permita explorar diferentes niveles de pH, temperatura y tiempos de extracción, con el fin de determinar las condiciones óptimas para la extracción de pectina con las características deseadas. El control y la comprensión de estas variables son fundamentales para garantizar la reproducibilidad y calidad del producto final en este proceso.

Por lo que inicialmente se realizaron pruebas preliminares para determinar los rangos de pH, temperatura y tiempo de hidrólisis. (ver Anexo 1)

2.3.1. pH

Es una variable independiente en la investigación y su valor varía según la materia prima utilizada para la extracción. En este estudio, se analizó el efecto del pH en dos niveles diferentes (1,5 y 2,5) en relación con la variable de rendimiento. En general, se observa una tendencia clara de disminución en el porcentaje de pectina extraída a medida que aumenta el pH. Esto indica que un pH más alto tiene un impacto negativo en la cantidad de pectina obtenida durante el proceso de extracción.

2.3.2. Temperatura de hidrólisis

En este trabajo de investigación, se consideró un rango de temperatura de hidrólisis entre 60 y 80 °C. Se destaca que la temperatura de hidrólisis ácida fue una variable de estudio estadísticamente significativa para el rendimiento en la extracción de pectina, según investigaciones preliminares.

El aumento de temperatura durante la hidrólisis ácida favorece la solubilización de la pectina y otros componentes pécticos presentes en la pared celular, lo que resulta en un mayor rendimiento de pectina. Una temperatura baja puede ser insuficiente para lograr la hidrólisis de la protopectina, que es la forma insoluble de pectina.

2.3.3. Tiempo de hidrólisis

Es una variable independiente que se refiere al tiempo de duración de la etapa de hidrólisis ácida. En esta investigación, se estudiará el efecto del tiempo de hidrólisis en el rendimiento de la pectina extraída. Los rangos de tiempo de hidrólisis considerados en el presente estudio están comprendidos entre 60 y 90 min. Se busca determinar cómo la variación en el tiempo de hidrólisis afecta la cantidad de pectina obtenida durante el proceso de extracción.

❖ Variables dependientes

- Rendimiento (% η)

❖ Variables independientes

- pH (H^+)
- Temperatura de hidrólisis ($^{\circ}C$)
- Tiempo de hidrólisis (min)

2.4. Diseño experimental

El diseño experimental es una técnica estadística, que tiene por objetivo definir el número de pruebas que se van a realizar en una investigación manipulando dos o más variables independientes del sujeto de estudio y según esto observar los cambios que se producen en la variable respuesta.

Los diseños factoriales más sencillos son los diseños 2^k , “k” corresponde al número de factores que intervienen en el proceso, con dos niveles cada uno y requieren de 2^k experimentos. Cada factor se estudia a dos niveles: nivel o valor alto (+) y nivel o valor bajo (-). Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones posibles de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores. (ver Anexo 2)

Son denominados diseño factorial 2^k los diseños en los cuales cada uno de los factores cuenta con dos niveles, es decir cuando se realiza un experimento con un

número de factores k en el que cada uno de estos solo puede adoptar dos niveles. Estos niveles podrían ser cuantitativos o cualitativos y una réplica completa de tal diseño requiere que realizar 2^k combinaciones.

Este diseño describe como realizar los experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir su interaccionan entre ellos.

k = número de factores; número de columnas

(+) = nivel o valor alto

(-) = nivel o valor bajo

2^k = número de experimentos; número de filas

Se debe considerar también los factores externos que puedan afectar el experimento, evaluando si alguna variable adicional modificada intencionalmente podría haber influido en la variable dependiente.

2.4.1. Matriz de experimentos para la etapa de activación el diseño factorial completo 2^3

Se trabajó con 8 diferentes combinaciones con las 3 variables a 2 niveles. Lo que permitió evaluar las variables y sus interacciones al mismo tiempo.

$$2^3=8$$

Donde:

2 = niveles

3= Variables

8 = Conjunto de posibles combinaciones

Tabla II-5 Matriz de experimentos

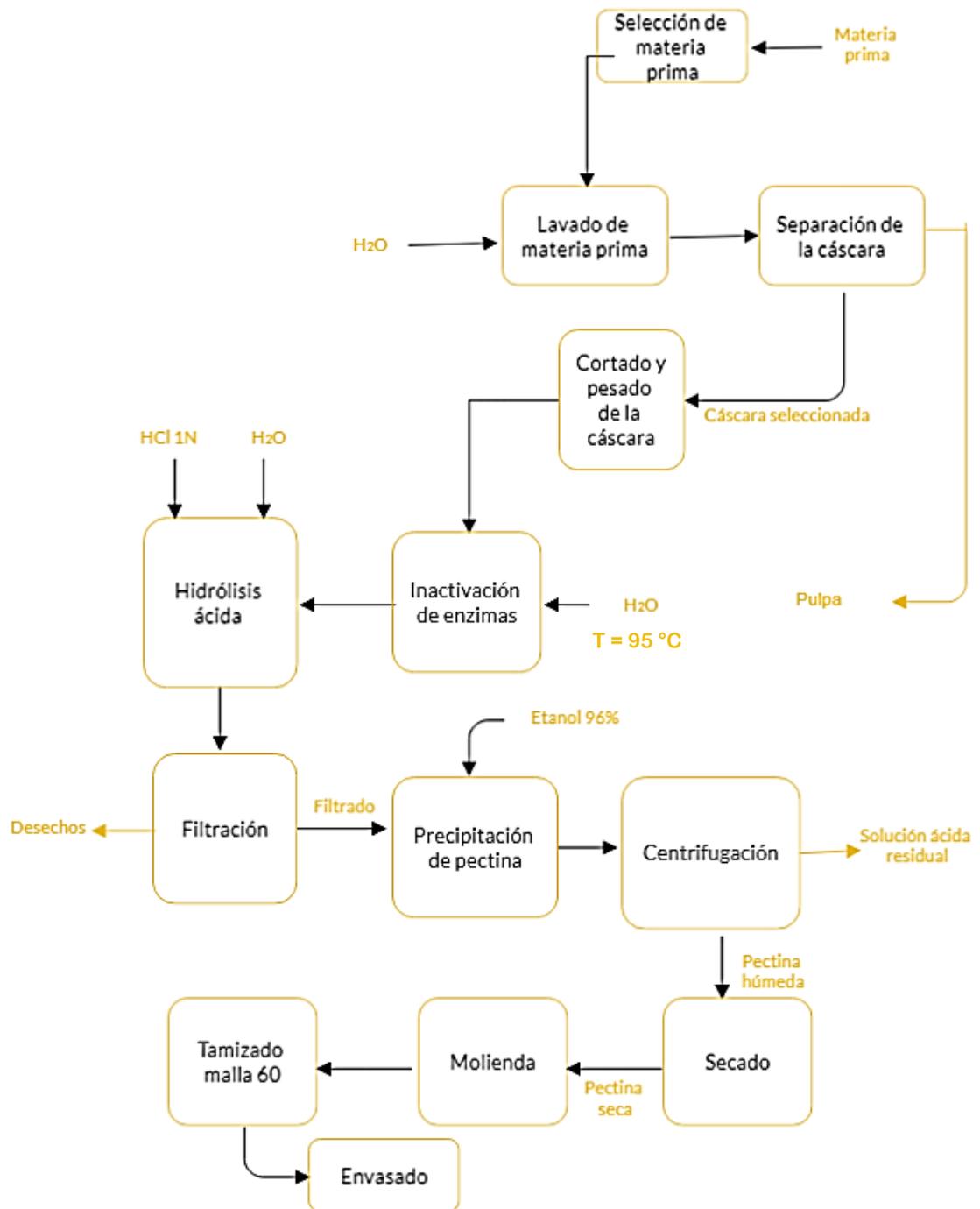
Experimento	Etiquetas	Matriz de experimentos			Plan de experimentación		
		variable A	variable B	variable C	pH (H ⁺)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	(1)	-	-	-	1,5	60	60
2	a	+	-	-	2,5	60	60
3	b	-	+	-	1,5	80	60
4	ab	+	+	-	2,5	80	60
5	c	-	-	+	1,5	60	90
6	ac	+	-	+	2,5	60	90
7	bc	-	+	+	1,5	80	90
8	abc	+	+	+	2,5	80	90

Fuente: Elaboración propia, 2023

El dominio experimental de una variable continua se expresa con los valores mínimo y máximo que puede tomar, y se le asigna la notación codificada: (-) nivel inferior, (+) nivel superior.

2.5. Descripción del proceso experimental seleccionado

Figura 2-1 Proceso seleccionado para la extracción de pectina de cáscara de maracuyá por hidrólisis ácida convencional



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.1. Selección de la materia prima

Se seleccionaron maracuyás maduros y de buen estado ya que la calidad de la cáscara afecta directamente a la calidad de la pectina. La composición del fruto está descrito en el punto 1.7.1. pág. 18

2.5.2. Lavado de la materia prima

Se lavaron los maracuyás para eliminar suciedad y residuos superficiales, esto para reducir la carga microbiana de la cáscara.

Fotografía N° 2-1 Maracuyá

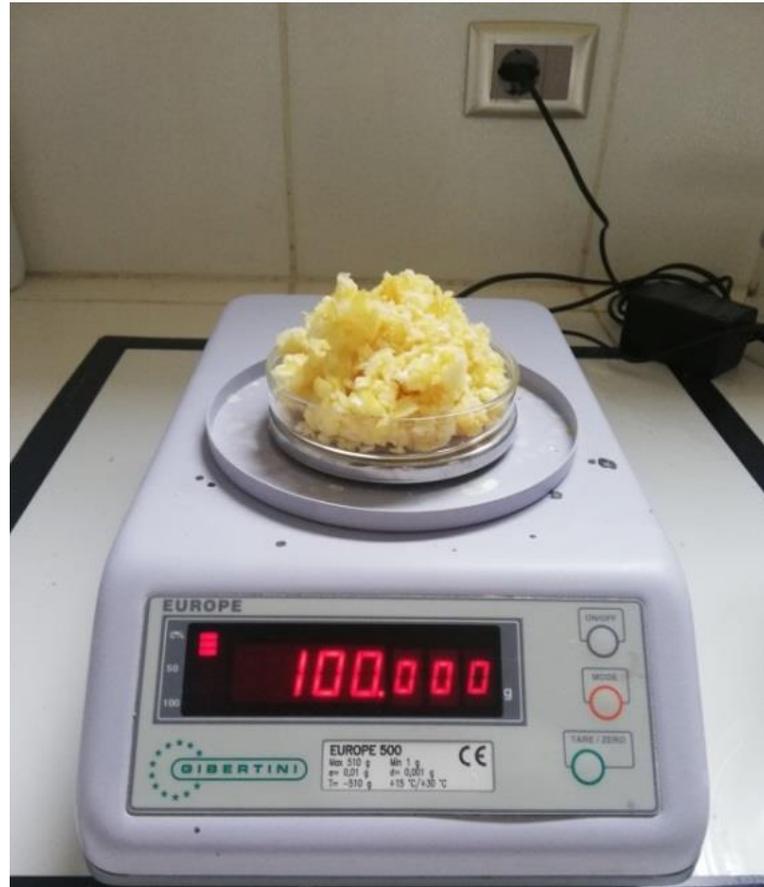


Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.3. Cortado y pesado de la materia prima

Se cortaron los maracuyás y se separó la pulpa de los mismos, el corte de la cáscara debe tener un tamaño uniforme y pequeño. Posteriormente se procedió al pesado de la materia prima utilizando una balanza analítica.

Fotografía N° 2-2 Corte y pesado de epicarpio y mesocarpio

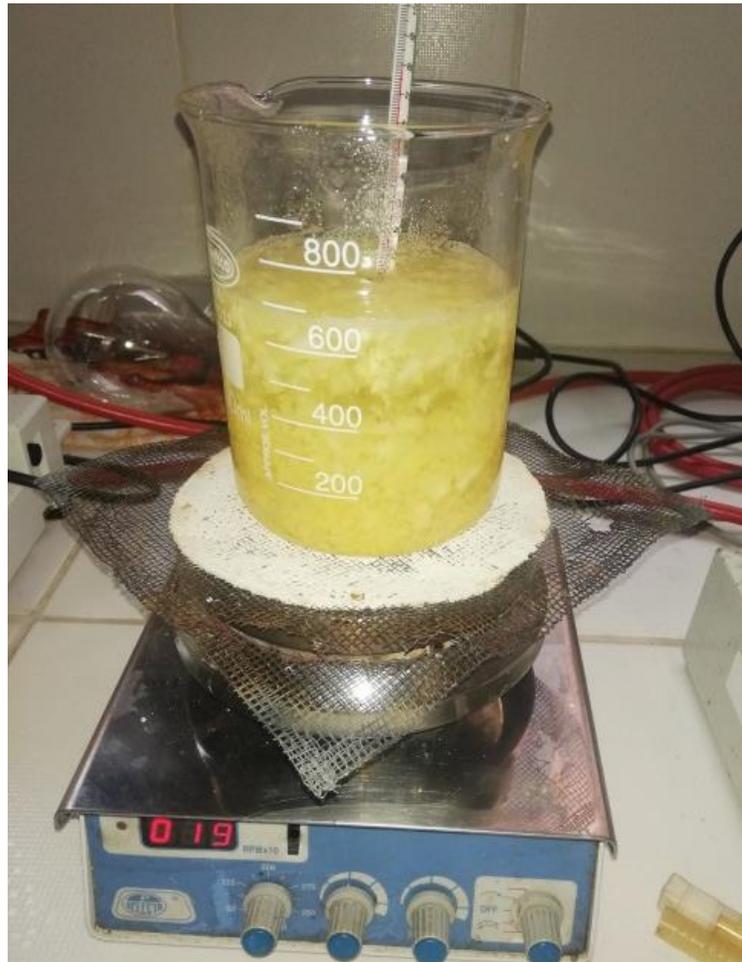


Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.4. Inactivación de enzimas

Para la inactivación enzimática se agregó 100 g de cáscara de maracuyá, previamente pesada en una balanza analítica, en 500 ml de agua. La mezcla se calentó gradualmente hasta alcanzar el punto de ebullición durante 20 min utilizando un calentador-agitador magnético.

Fotografía N° 2-3 Inactivación enzimática

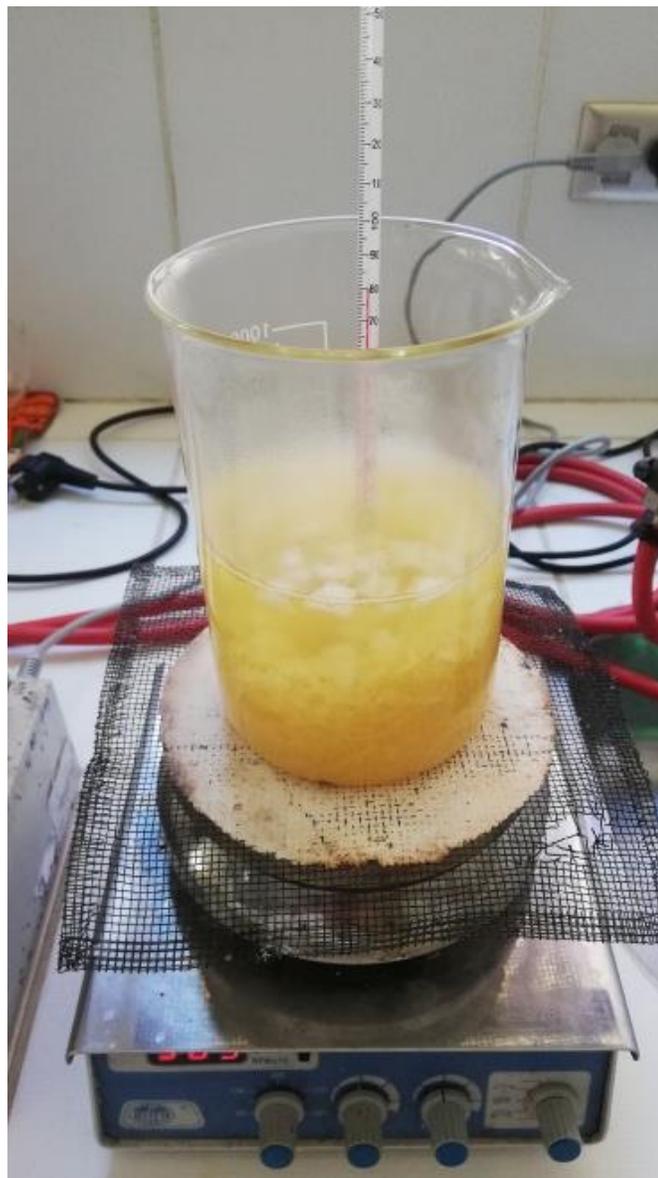


Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.5. Hidrólisis ácida

En el proceso de extracción de pectina de la cáscara de maracuyá, se utilizó el método de hidrólisis ácida convencional. En este proceso, se agregó una solución de HCl 1 N y se ajusta cuidadosamente el pH de la mezcla entre 1,5 y 2,5 utilizando un pH-metro. Una vez que se ha logrado el ajuste del pH, la muestra se somete a calentamiento durante 60 - 90 min utilizando un calentador-agitador magnético para asegurar una agitación constante. En esta etapa se descomponen las estructuras de la cáscara de maracuyá, lo que facilita la separación eficiente de la pectina de la cáscara.

Fotografía N° 2-4 Hidrólisis ácida



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.6. Filtración

La filtración se realizó utilizando un sistema de vacío, esto para separar las partículas sólidas suspendidas en la solución obtenida de la hidrólisis ácida.

Fotografía N° 2-5 Filtrado al vacío de la solución hidrolizada



Fuente: Elaboración propia, 2023

El bagazo de maracuyá acidificado obtenido mediante el proceso de filtrado, puede venderse a terceros, responsables de la producción de fertilizantes orgánicos.

2.5.7. Precipitación

Se adicionó etanol al 96 %, en el que se utilizó un volumen del alcohol equivalente al 80 % de la solución para precipitar la pectina, se deja reposar la solución por un tiempo de 16 - 18 h. (ver Anexo 1)

Fotografía N° 2-6 Precipitación de pectina con etanol

Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.8. Centrifugación

Posteriormente, se llevó a cabo la separación de la pectina del líquido mediante el proceso de centrifugación por un tiempo de 15 min para cada ciclo a 8000 r/min. (ver Anexo 1)

Fotografía N° 2-7 Centrifugación de pectina



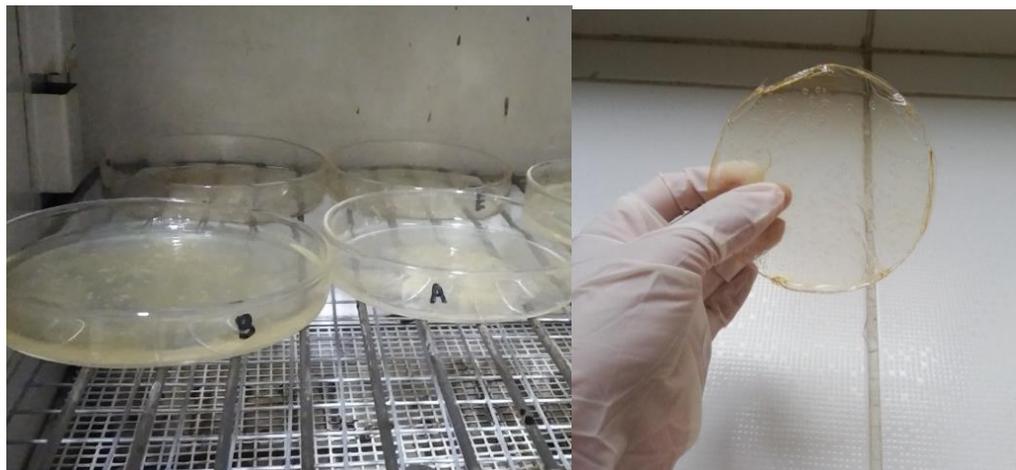
Fuente: Elaboración propia, 2023

La masa de solución ácida residual el cual contiene etanol que se utilizó para precipitar la pectina, se puede recuperar parte de este compuesto por destilación y poder reutilizarlos en el proceso de extracción.

2.5.9. Secado

El proceso de secado de la pectina húmeda se realizó en el incubador a una temperatura constante aproximadamente de 45 ± 2 °C (ver Anexo 1) hasta obtener un peso constante, al secar se observó que el color de la pectina se oscurece.

Fotografía N° 2-8 Secado de pectina



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.10. Molienda

Para reducir el tamaño se empleó un mortero para triturar la pectina seca y así obtener un producto en polvo fino con una mejor apariencia.

Fotografía N° 2-9 Molienda de la pectina



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.11. Tamizado

Para homogenizar el tamaño del polvo de pectina obtenido se colocó en un tamizador de diferente abertura de malla. La pectina debe pasar a través de la malla N°60 ASTM, y así obtener un producto homogenizado. El tamizado de la pectina a una malla 60 ASTM es un estándar de la industria en la producción de pectina, ya que un polvo fino es esencial para garantizar la calidad, la homogeneidad, la funcionalidad y la facilidad de uso de la pectina en diversas aplicaciones industriales y alimentarias.

Fotografía N° 2-10 Tamizado de pectina



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.5.12. Envasado

La pectina molida y tamizada se pesó, y se almacenó en bolsas de polietileno de alta densidad en un lugar seco a una temperatura de 20 - 22 °C para evitar la contaminación y modificaciones en su apariencia y en su calidad. Luego se realizó su caracterización fisicoquímica del producto obtenido.

Fotografía N° 2-11 Pectina envasada



Fuente: Elaboración propia, 2023

2.6. Equipos, materiales reactivos

Los equipos empleados durante el desarrollo de la parte experimental para la extracción de la pectina se mencionan a continuación, además de sus especificaciones.

2.6.1. Equipos

Se utilizaron diferentes equipos los cuales son necesarios para la extracción experimental de la pectina, tal como se visualiza en la tabla II-6. (ver Anexo 5)

Tabla II-6 Equipos usados en la extracción de pectina

N°	Equipo
1	Balanza analítica
2	Calentador – agitador magnético
3	pH-metro
4	Bomba de vacío
5	Incubadora microbiológica como secador
6	Viscosímetro rotacional
7	Tamizador
8	Centrífuga

Fuente: Elaboración propia, 2023

2.6.2. Materiales de laboratorio

Se utilizaron diferentes materiales los cuales son necesarios para la extracción experimental de la pectina, tal como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla II-7 Materiales usados en la extracción de pectina

MATERIAL	TIPO	CAPACIDAD/TAMAÑO	CANTIDAD
Vasos de precipitado	Vidrio borosilicato	1000 ml	3
Vasos de precipitado	Vidrio borosilicato	250 ml	3
Probetas	Vidrio borosilicato	100 ml	1
Probetas	Vidrio borosilicato	25 ml	1
Probetas	Plástico	250 ml	1
Embudo Büchner	Porcelana	Grande	1
Vidrio reloj	Vidrio pyrex	Grande	2
Espátula	Metal	Pequeña	1
Matraz Erlenmeyer	Vidrio borosilicato	250 ml	2
Matraz Kitasato	Vidrio borosilicato	1000 ml	1
Bureta	Vidrio borosilicato	50 ml	1
Caja Petri	Vidrio borosilicato	100 mm	4
Varilla	Vidrio pyrex	Mediano	2
Mortero	Porcelana	Mediano	1
Cuchillo	Acero inoxidable	Mediano	1
Termómetro	de Hg	-10 a 200 °C	1
Papel filtro	-----	Grande	100
Frasco lavador	Plástico	800 ml	1

Fuente: Elaboración propia, 2023

2.6.3. Reactivos utilizados

Los reactivos que se emplearon para la extracción experimental de pectina son los siguientes:

- ✓ Ácido clorhídrico 1 N.
- ✓ Etanol al 96 %.
- ✓ Agua destilada.

Los reactivos que se emplearon para la caracterización fisicoquímica de la pectina son los siguientes:

1. Indicador fenolftaleína.
2. Hidróxido de sodio 0,25 N.
3. Hidróxido de sodio 0,1 N.
4. Ácido clorhídrico 0,25 N.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Presentación de los resultados de la caracterización de la cáscara de maracuyá

El análisis de la materia prima para el desarrollo experimental del presente trabajo se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la UAJMS, en la tabla III-1 se muestran los resultados obtenidos. (ver Anexo 6)

Tabla III-1 Caracterización fisicoquímica de la cáscara de maracuyá

Parámetro	Unidad	Resultado
Acidez	%	0,43
Cenizas	%	1,24
Humedad	%	84,28
Sólidos solubles	°Brix	3,80
pH (20°C)	H ⁺	4,64

Fuente: CEANID, 2023

3.2. Presentación de los resultados del producto extraído

3.2.1. Resultados de rendimiento del proceso

De acuerdo al diseño factorial, se procedió a extraer la pectina de la cáscara de maracuyá con 100 g de materia prima, a una temperatura de 60 y 80 °C, con un pH de 1,5 y 2,5 y con un tiempo de hidrólisis de 60 y 90 min. Se determinó el rendimiento y se establecieron los parámetros óptimos para el proceso de extracción.

Tabla III-2 Resultados de rendimiento de la pectina extraída

N° de experimento	Parámetros de extracción			Réplicas (% m/m)			Promedio
	pH	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	1	2	3	
1	1,5	60	60	0,864	0,719	0,771	0,785
2	2,5	60	60	0,211	0,199	0,201	0,204
3	1,5	80	60	1,151	1,159	1,153	1,154
4	2,5	80	60	0,707	0,820	0,805	0,777
5	1,5	60	90	0,967	1,028	0,981	0,992
6	2,5	60	90	0,408	0,539	0,501	0,483
7	1,5	80	90	1,698	1,569	1,621	1,629
8	2,5	80	90	1,021	1,042	1,019	1,027

Fuente: Elaboración propia, 2023

Según los resultados obtenidos, los parámetros óptimos para la extracción de pectina a partir de la cáscara de maracuyá son del experimento 7, el cual se realizó a una temperatura de hidrólisis de 80 °C, con un pH de 1,5 y un tiempo de hidrólisis de 90 min, el cual presento un mayor rendimiento cuyo promedio es de 1,629 % m/m.

3.2.2. Presentación de los resultados de la caracterización fisicoquímica de la pectina extraída

3.2.2.1. Resultados de pH, cenizas y humedad

Con los parámetros que se indica en el número de experimento 7, con los cuales se obtiene un mayor rendimiento, se extrae pectina para la realización de la caracterización fisicoquímica en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la UAJMS en la tabla III-3 se muestra el detalle de los resultados. (ver Anexo 7)

Tabla III-3 Caracterización fisicoquímica de la pectina de la cáscara de maracuyá

Parámetro	Unidad	Resultado
Cenizas	%	3,52
Humedad	%	7,29
pH (20°C)	H ⁺	3,55
Bacterias aerobias mesófilas	UFC/g	100
Coliformes totales	UFC/g	< 10

Fuente: CEANID, 2023

3.2.2.2. Resultados de acidez libre y peso equivalente

Para la determinación de acidez libre y peso equivalente se realizó ensayos por triplicado, en el cual se gastó un promedio de 0,59 miliequivalentes de NaOH (5,93 ml). En la tabla III-4 se exponen los resultados del análisis de acidez libre y peso equivalente de la pectina extraída, los cuales son determinados mediante titulación ácido-base.

Tabla III-4 Resultados del análisis de acidez libre y peso equivalente de la pectina

N° experimento 7			
N° réplica	Mili-equivalentes NaOH gastados	Acidez libre (meq NaOH/g Pectina)	Peso equivalente (mg Pectina/ meq NaOH)
1	0,58	1,16	862,07
2	0,61	1,22	819,67
3	0,59	1,18	847,46
Promedio	0,59	1,19	843,07

Fuente: Elaboración propia, 2023

La pectina extraída presentó un valor promedio de 1,19 meq NaOH/g pectina de acidez libre. Entonces por cada gramo de pectina, se requieren 1,19 miliequivalentes de NaOH para neutralizar la acidez presente en la muestra. Un bajo valor de acidez libre en la pectina extraída suele asociarse con una mayor calidad y pureza del producto, lo que es fundamental para su uso en diversas aplicaciones industriales y alimentarias donde se requiere una pectina de alta calidad.

3.2.2.3. Resultados del porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y ácido anhídrido galacturónico

Para la determinación del porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y ácido anhídrido galacturónico se hicieron ensayos por triplicado, los cuales son determinados mediante titulación ácido-base, en las que se gastó un promedio 1,016 miliequivalentes de NaOH (10,16 ml).

Tabla III-5 Resultados del análisis de porcentaje de metoxilo, grado de esterificación y ácido anhídrido galacturónico

N° experimento 7				
N° réplica	miliequivalentes NaOH gastados	Contenido de metoxilo (%)	Grado de esterificación (%)	Ácido anhídrido galacturónico (%)
1	1,05	6,51	64,42	56,73
2	0,99	6,14	62,26	54,83
3	1,01	6,26	63,13	55,59
Promedio	1,02	6,30	63,27	55,72

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.2.2.4. Resultados de grado de gelificación

El gel que presentó las características más apropiadas es la muestra N° 3 se presenta mejores resultados de gelificación (mayor rapidez y consistencia) lo cual demuestra una gelificación rápida. Por lo tanto, el grado de gelificación de la pectina extraída es de 66,67 °SAG. Observando que mientras mayor es la cantidad de pectina empleada para formar geles, menor es el grado de gelificación.

Tabla III-6 Resultados del análisis de grado de gelificación y viscosidad

N° experimento 7			
N°	Pectina (g)	Grado de Gelificación (°SAG)	Viscosidad a 60°C (cP)
1	0,5	200	490
2	1	100	880
3	1,5	66,67	1511

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.3. Comparación entre la pectina extraída a partir de la cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) y la pectina estándar

Tabla III-7 Análisis fisicoquímico de la pectina extraída en comparación con la pectina estándar

Parámetro	Unidad	Pectina estándar	Pectina extraída de la cáscara de maracuyá
Acidez libre	meq/g	0,78 ± 0,46	1,18
Cenizas	%	0,37 ± 3,39	3,52
Humedad	%	8,51 ± 1,95	7,29
pH (20°C)	H+	2,8 - 3,60	3,55
Peso equivalente	mg/meq	1775,46 ± 1143,78	843,066
Contenido de metoxilo	%	6,93 ± 3,22	6,303
Grado de esterificación	%	74,71 ± 3,32	63,269
Ácido galacturónico	%	68,29 ± 13,39	55,719
Grado de gelificación	°SAG	150 ± 5	66,67
Color	-	blanco crema	beige claro
Bacterias aerobias mesófilas	UFC/g	200	100
Coliformes totales	UFC/g	Ausente	Ausente

Fuente: Elaboración propia, 2023

Los valores obtenidos en la caracterización de la pectina extraída son comparados con la tabla I-6 avalados por la FAO, FCC y ECC.

Los valores obtenidos de pH y cenizas de la pectina extraída son de 3,55 y 3,52 respectivamente, los cuales se encuentran dentro del rango establecido de la pectina estándar. El pH bajo favorece la formación de geles, en consecuencia, las cenizas se definen como el residuo inorgánico que se obtiene al incinerar la materia orgánica en un producto cualquiera, por lo que un bajo contenido de cenizas indica una menor presencia de impurezas inorgánicas en el producto.

El valor de la humedad de la pectina extraída es de 7,29 % encontrándose en el rango de pectina estándar, este es importante ya que la humedad puede influir en la estabilidad, la textura y la calidad de la pectina.

Se obtuvo una acidez libre 1,19 meq/g de la pectina extraída que está ligeramente por encima del rango especificado en la pectina estándar. Y un peso equivalente 843,07 mg/meq, el cual se encuentra dentro del rango establecido de la pectina estándar. La acidez libre representa los carboxilos libres en la cadena lineal de la pectina y el peso equivalente está definido como el número de mg de ácido galacturónico puro por miliequivalente de grupos carboxilo libres.

La pectina extraída de la cascara de maracuyá, señalan que se encuentra en un rango de calidad aceptable en función del contenido de metoxilo y de ácido galacturónico. Partiendo de que el contenido de metoxilo contribuye por un lado a regular la velocidad de gelificación y también es responsable de algunas propiedades organolépticas de los geles pectina-azúcar, y el ácido galacturónico es el parámetro más importante para determinar su calidad, es decir, que entre mayor es el porcentaje del ácido galacturónico mayor es la pureza.

Se obtuvo un grado de esterificación de 63,27 % en la pectina extraída, por lo tanto, se clasifica como pectina de alto metoxilo, debido a que se obtiene una pectina de alto grado de esterificación, mayor es la temperatura de gelificación.

El grado de gelificación de la pectina extraída es de 67 °SAG, se demuestra una gelificación rápida, esto se debe a que se obtuvo una pectina con un alto grado de esterificación o de metoxilación y esta característica química determina su capacidad para formar geles en presencia de azúcar y ácido.

Las bacterias aerobias mesófilas con un valor de 100 UFC/g, es importante destacar que la presencia de bacterias aerobias mesófilas en los alimentos no necesariamente indica la presencia de microorganismos patógenos. Y esta se encuentra dentro del rango establecido de la pectina estándar. Por otra parte, los coliformes totales que son ausentes, sabiendo que los coliformes totales son bacterias que se pueden encontrar en el ambiente. Y de igual manera su presencia no indica necesariamente contaminación fecal, revelan que el alimento estuvo expuesto a una contaminación general.

3.4. Análisis estadístico

Para la realización de análisis estadístico para la extracción de pectina a partir de la cáscara del maracuyá se utilizó el programa Minitab Versión 19.

El Análisis de la Varianza (ANOVA) es una técnica estadística que se utiliza para comparar la media de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas.

3.4.1. Influencia del pH, temperatura y tiempo en el rendimiento de pectina

Los factores que más influyen en el rendimiento de pectina son el pH (a menor pH, mayor rendimiento) y la temperatura (a mayor temperatura, mayor rendimiento) debido que altas temperaturas ayudan a solubilizar la pectina y otros componentes pécticos presentes en la pared celular, mientras que el tiempo de extracción tiene una influencia más moderada.

En este apartado se analizó la influencia de estas tres variables independientes: la temperatura de hidrólisis, el pH y el tiempo de hidrólisis.

3.4.2. Análisis estadístico de la variable respuesta rendimiento

Para la realización del análisis estadístico para la variable respuesta rendimiento de la pectina extraída a partir de la cáscara del maracuyá, se tomaron los valores de la tabla III-8.

Tabla III-8 Resumen del diseño

Factores:	3	Diseño de la base:	3,8
Corridas:	24	Réplicas:	3
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Fuente: Minitab 19, 2024

Tabla III-9 Diseño factorial variable respuesta rendimiento

Orden Corrida	PtCentral	Bloques	pH	Temperatura	Tiempo	Rendimiento
1	1	1	1,5	60	60	0,864
2	1	1	2,5	60	60	0,211
3	1	1	1,5	80	60	1,151
4	1	1	2,5	80	60	0,707
5	1	1	1,5	60	90	0,967
6	1	1	2,5	60	90	0,408
7	1	1	1,5	80	90	1,698
8	1	1	2,5	80	90	1,021
9	1	1	1,5	60	60	0,719
10	1	1	2,5	60	60	0,199
11	1	1	1,5	80	60	1,159
12	1	1	2,5	80	60	0,820
13	1	1	1,5	60	90	1,028
14	1	1	2,5	60	90	0,539
15	1	1	1,5	80	90	1,569
16	1	1	2,5	80	90	1,042
17	1	1	1,5	60	60	0,771
18	1	1	2,5	60	60	0,201
19	1	1	1,5	80	60	1,153
20	1	1	2,5	80	60	0,805
21	1	1	1,5	60	90	0,981

22	1	1	2,5	60	90	0,501
23	1	1	1,5	80	90	1,621
24	1	1	2,5	80	90	1,019

Fuente: Minitab 19, 2024

3.4.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III-10 Coeficientes codificados variable respuesta rendimiento

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0,8814	0,0099	88,24	0	
pH	-0,5173	-0,2586	0,0099	-25,89	0	1
Temperatura	0,5313	0,2656	0,0099	26,59	0	1
Tiempo	0,3028	0,1514	0,0099	15,16	0	1
pH*Temperatura	0,0278	0,0139	0,0099	1,39	0,183	1
pH*Tiempo	-0,0383	-0,0191	0,0099	-1,92	0,073	1
Temperatura*Tiempo	0,0596	0,0298	0,0099	2,99	0,009	1
pH*Temperatura*Tiempo	-0,0741	-0,0370	0,0099	-3,71	0,002	1

Fuente: Minitab 19, 2024

En la tabla III-10 el modelo estadístico contiene 3 efectos principales, 3 interacciones de dos factores y 1 de tres factores como puede observarse algunos de esos términos no son significativos estadísticamente.

Con la idea de aclarar mejor cuales fuentes de variación son significativas y obtener un modelo final en el que solo se incluyan términos significativos, es usual construir un mejor ANOVA, en el que los efectos que claramente no son significativos se eliminan del análisis en la primera ronda y se mandan al error.

A partir de los resultados de la tabla III-10, se realizó un nuevo análisis de varianza se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla III-11 Coeficientes codificados variable respuesta rendimiento 2

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0,8814	0,0109	80,51	0,000	
pH	-0,5173	-0,2587	0,0109	-23,63	0,000	1,00
T	0,5313	0,2657	0,0109	24,27	0,000	1,00
Tiempo	0,3028	0,1514	0,0109	13,83	0,000	1,00
T*tiempo	0,0597	0,0298	0,0109	2,72	0,014	1,00
pH*T*tiempo	-0,0742	-0,0371	0,0109	-3,39	0,003	1,00

Fuente: Minitab 19, 2024

En la tabla III-11 el FIV (Factor de Varianza Inflada) \geq que 1 nos informa acerca de la no presencia de multicolinealidad. La multicolinealidad ocurre cuando las variables independientes (predictores) en un modelo de regresión están correlacionadas, esto se debe a que, si el grado de correlación entre las variables independientes es alto, no podremos aislar la relación entre cada variable independiente y la variable dependiente (respuesta).

Tabla III-12 Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0536364	98,69 %	98,33 %	97,67 %

Fuente: Minitab 19, 2024

La tabla III-12 nos muestra que el R-cuadrado indica que el modelo explica el 98,69 % de la variabilidad en el rendimiento de pectina esto nos indica que el modelo se ajusta extremadamente bien a los datos experimentales. El estadístico R-cuadrado ajustado para los grados de libertad, 98,33 % es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes. El error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuales es de 0,0536364.

Tabla III-13 Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de pectina con un nivel de significancia de 5 %

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	3,90431	0,78086	271,43	0,000
Lineal	3	3,84994	1,28331	446,08	0,000
pH	1	1,60580	1,60580	558,18	0,000
T	1	1,69389	1,69389	588,80	0,000
t	1	0,55025	0,55025	191,27	0,000
Interacciones de 2 términos	1	0,02136	0,02136	7,42	0,014
T*t	1	0,02136	0,02136	7,42	0,014
Interacciones de 3 términos	1	0,03300	0,03300	11,47	0,003
pH*T*t	1	0,03300	0,03300	11,47	0,003
Error	18	0,05178	0,00288		
Falta de ajuste	2	0,01346	0,00673	2,81	0,090
Error puro	16	0,03832	0,00239		
Total	23	3,95609			

Fuente: Minitab 19, 2024

La tabla III-13 del análisis de varianza reparte la variabilidad de la respuesta rendimiento en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental. Para el presente proyecto, los efectos principales tienen valores $p < 0,05$, indicando que son iguales a cero para un nivel de confianza de 95 %.

3.4.4. Ecuación de la regresión lineal de la variable respuesta rendimiento

Esta ecuación relaciona específicamente los niveles de los factores pH, temperatura y tiempo del diseño experimental planteado, donde el rendimiento está en g pectina/100 g de cáscara.

$$\text{Rendimiento} = 0,8814 - 0,2587 \text{ pH} + 0,2657 \text{ T} + 0,1514 \text{ t} + 0,0298 \text{ T*t} - 0,0371 \text{ pH*T*t}$$

Tabla III-14 Resultados de la variable respuesta rendimiento

Muestra	Rendimiento experimental	Rendimiento Ajustado	Residuos	% variación T*t	% variación pH*T*t
1	0,864	0,7899	0,0741	3,773	4,697
2	0,211	0,1984	0,0126	15,020	18,700
3	1,151	1,1874	-0,0364	2,510	3,124
4	0,707	0,7443	-0,0373	4,004	4,985
5	0,967	0,9589	0,0081	3,108	3,869
6	0,408	0,5158	-0,1078	5,777	7,193
7	1,698	1,6241	0,0739	1,835	2,284
8	1,021	1,0326	-0,0116	2,886	3,593
9	0,719	0,7899	-0,0709	3,773	4,697
10	0,199	0,1984	0,0006	15,020	18,700
11	1,159	1,1874	-0,0284	2,510	3,124
12	0,82	0,7443	0,0757	4,004	4,985
13	1,028	0,9589	0,0691	3,108	3,869
14	0,539	0,5158	0,0232	5,777	7,193
15	1,569	1,6241	-0,0551	1,835	2,284
16	1,042	1,0326	0,0094	2,886	3,593
17	0,771	0,7899	-0,0189	3,773	4,697
18	0,201	0,1984	0,0026	15,020	18,700
19	1,153	1,1874	-0,0344	2,510	3,124
20	0,805	0,7443	0,0607	4,004	4,985
21	0,981	0,9589	0,0221	3,108	3,869
22	0,501	0,5158	-0,0148	5,777	7,193
23	1,621	1,6241	-0,0031	1,835	2,284
24	1,019	1,0326	-0,0136	2,886	3,593

Fuente: Minitab 19, 2024

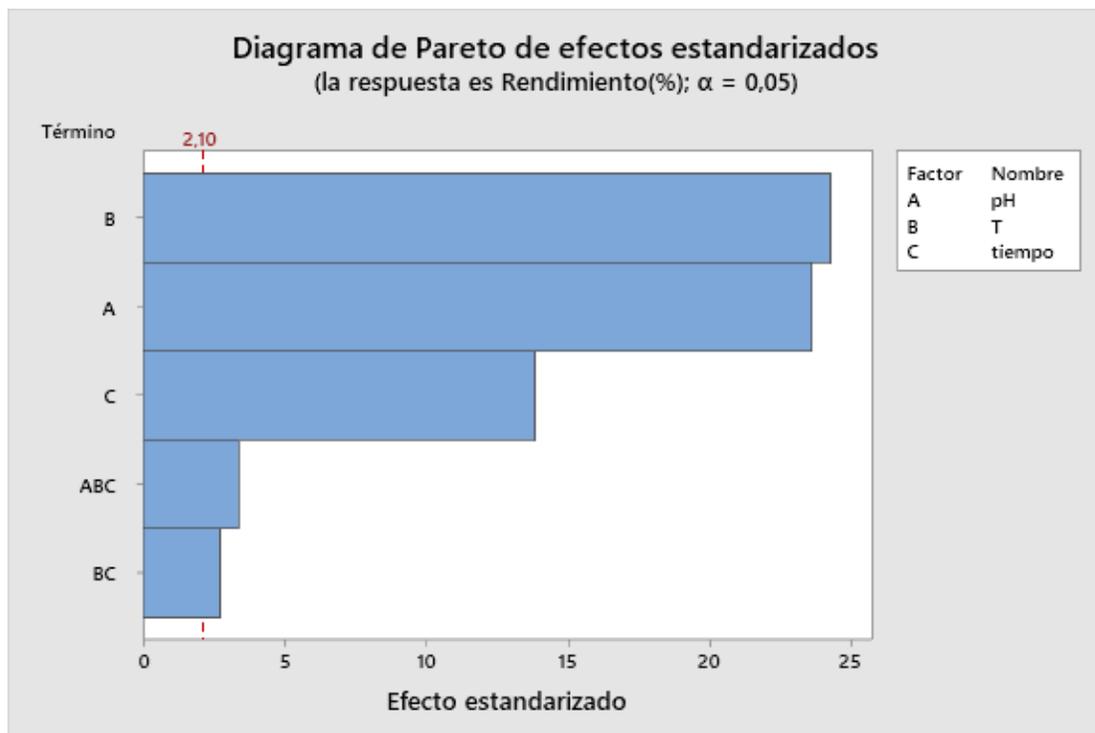
El rendimiento ajustado se refiere a la capacidad del modelo de regresión para explicar la variabilidad observada en la variable respuesta.

El residuo es la diferencia entre un valor observado de la variable respuesta y su valor ajustado correspondiente.

3.4.5. Diagrama de Pareto

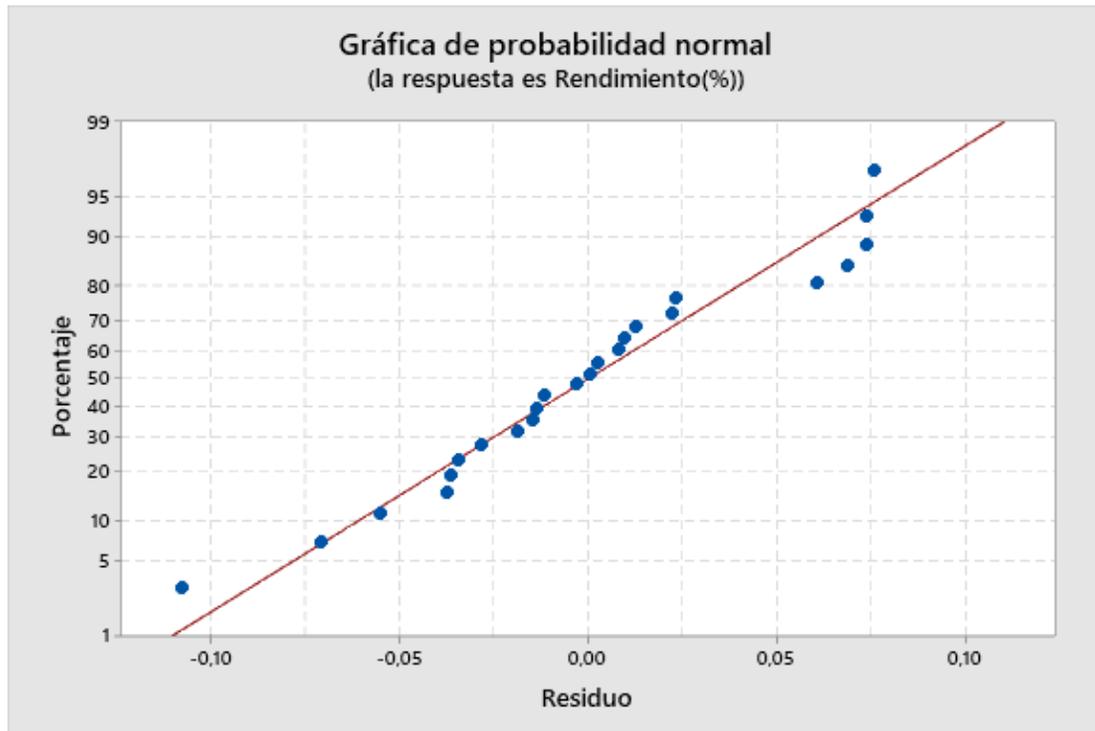
El diagrama de Pareto nos permite identificar visualmente los efectos importantes y comparar la magnitud relativa de los diversos efectos. Además, se puede observar que el efecto más grande es la temperatura (B) porque es el que más se extiende, seguido por el factor (A) el cual es el pH. La línea vertical crítica de 2,10 se utiliza para juzgar cuales efectos son significativos. Cualquier barra que se prolonga más allá de esa línea corresponde a efectos que son estadísticamente significativos al nivel de confianza de 95 %.

Figura 3-1 Diagrama de Pareto del proceso de extracción de pectina



Fuente: Minitab 19, 2024

Figura 3-2 Gráfica de probabilidad normal



Fuente: Minitab 19, 2024

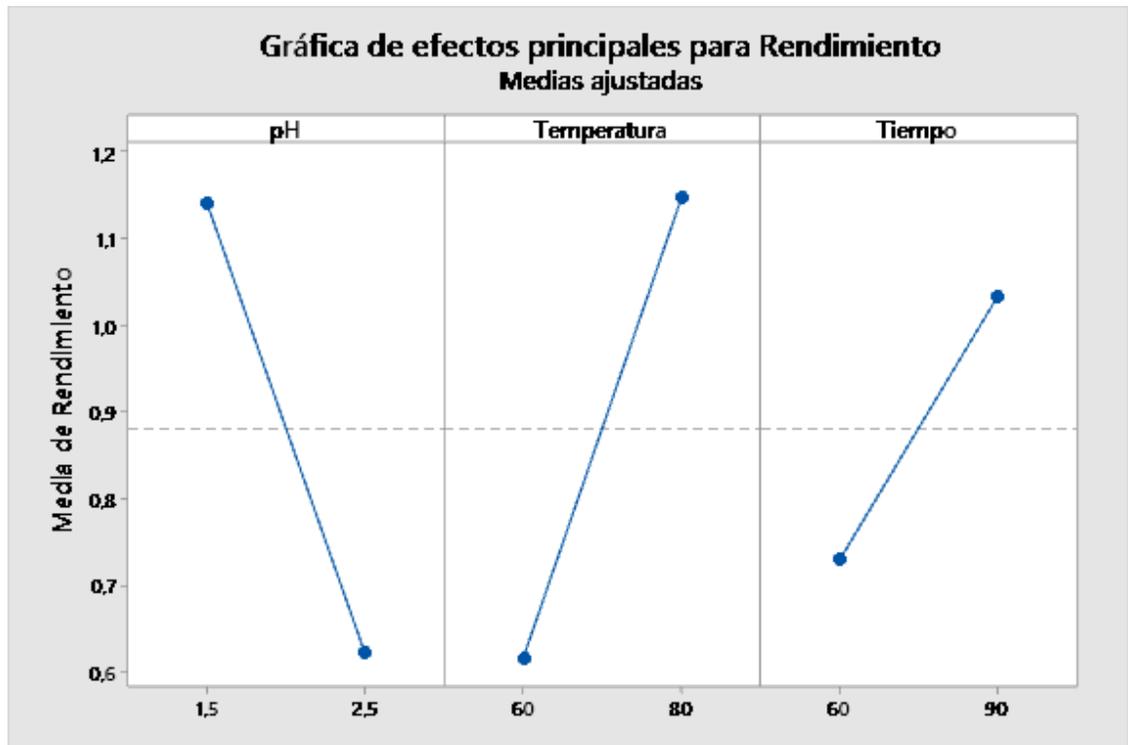
En la figura 3-2, nos permite verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos de forma normal. En este caso los residuos se mantienen describiendo una línea recta y no se muestran patrones de distribución que indican que no están distribuidos normalmente, por lo tanto, no hay evidencia de no normalidad.

Cabe recalcar que cuando se emplea un diseño factorial 2^k , se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango de variación de cada uno de los factores estudiados. No es necesario suponer una linealidad perfecta, pero no debe existir una curvatura muy grande. De esta manera dado que cada factor se prueba en dos niveles, no es posible estudiar efectos de curvatura.

Para estudiar un efecto lineal, o aproximadamente lineal, basta con probar los factores en dos niveles, mientras que para estudiar un efecto cuadrático son necesarios al menos tres niveles de los factores. (Gutiérrez & de la Vara, 2012)

3.4.6. Gráficas factoriales para el rendimiento

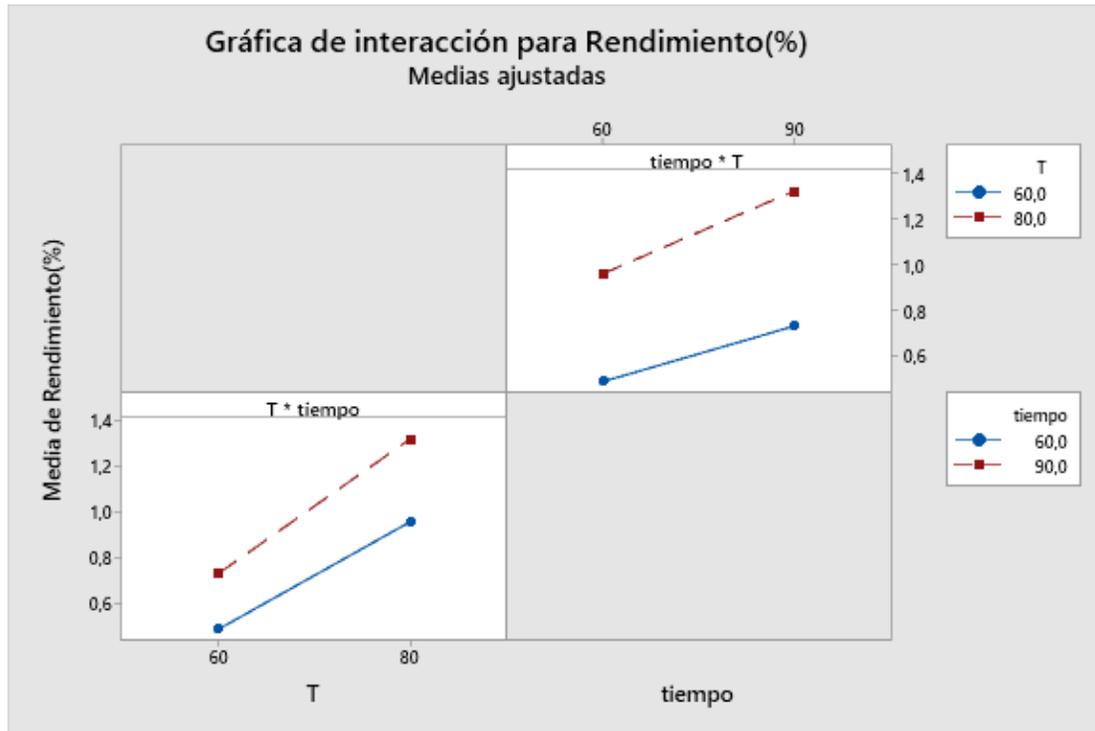
Figura 3-3 Efectos principales para rendimiento



Fuente: Minitab 19, 2024

En la figura 3-3 se observa los efectos principales, sabiendo que diferentes niveles del factor afectan la respuesta de manera diferente y mientras más inclinada sea la pendiente de la línea, mayor será la magnitud del efecto principal. Observando que un pH de 1,5, así como una temperatura máxima de 80 °C tienen una alta tasa de rendimiento y con un tiempo mayor de 90 min tiene una tasa media de rendimiento.

Figura 3-4 Gráfica de interacción CB y BC

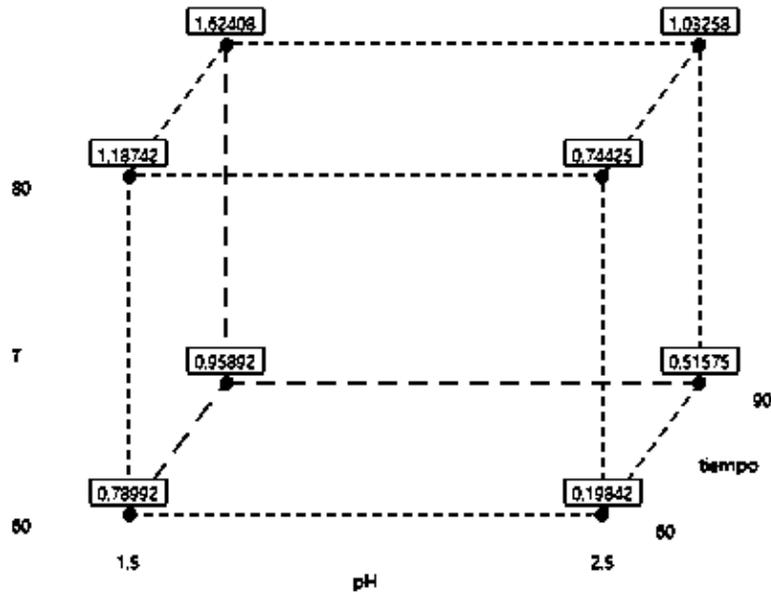


Fuente: Minitab 19, 2024

En la parte superior de la figura 3-4 se muestra la interacción CB donde el factor C se encuentra en el eje horizontal, mientras que en la parte inferior se representa el mismo efecto de interacción, pero ahora con el factor B está en el eje horizontal.

En la interacción CB se aprecia que, si C cambia de nivel bajo a alto, la variable respuesta (rendimiento) se incrementa para ambos niveles del factor B. Por lo tanto, la interacción CB es proporcional al rendimiento. De igual forma ocurre con la interacción BC que si se cambia el factor B de un nivel bajo a alto, el rendimiento aumenta de forma similar para ambos niveles del factor C.

Figura 3-5 Gráfica de cubos (medias ajustadas) del rendimiento



Fuente: Minitab 19, 2024

La figura 3-5, nos permite visualizar y comprender fácilmente los efectos de múltiples factores sobre una respuesta, facilitando la identificación de las condiciones óptimas y la interpretación de las interacciones entre los factores. En consecuencia, observamos que el mejor rendimiento (%) obtenido es a un pH de 1,5, temperatura de 80 °C y un tiempo de 90 min. Mientras que es el peor rendimiento (%) es a un pH de 2,5, temperatura de 60 °C y un tiempo de 60 min.

3.5. Balance de materia para el proceso de extracción de pectina a partir de la cáscara de maracuyá

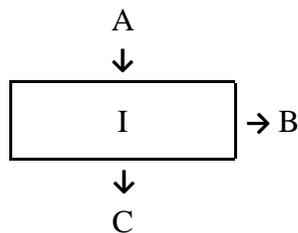
Se realizó el balance de materia por bloques, el cual se toma como base de cálculo 100 g de cáscara de maracuyá para la extracción de pectina.

Para realizar el balance se utilizaron los parámetros con los cuales se obtuvo mayor rendimiento en la extracción de pectina: Temperatura de hidrólisis de 80 °C, pH de 1,5 y un tiempo de hidrólisis de 90 min.

3.5.1. Pelado

El balance global para el bloque I se realizó según los datos obtenidos experimentalmente, así mismo se tiene que 458,25 g de maracuyá; 259,82 g corresponden a la cáscara, por tanto, se requieren 176,37 g de maracuyá para obtener 100 g de cáscara.

Figura 3-6 Etapa de pelado



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

A = Cantidad de maracuyá 176,37 g

B = Pulpa de maracuyá

C = Cáscara de maracuyá 100 g

Balance para I

$$A = B + C \quad \text{Ec. (3-1)}$$

De la ecuación (3-1):

$$B = 76,37 \text{ g}$$

3.5.2. Lavado

Para el lavado se utilizó una relación de 1000 ml de agua por cada 400 g de cáscara de maracuyá, entonces para 100 g de cáscara se necesitan 250 ml de agua.

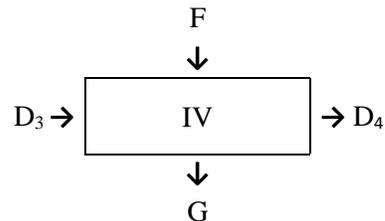
Considerando la densidad del agua igual a 1 g/ml, por lo que se utilizó 250 ml de agua para el respectivo lavado.

La cantidad de agua residual se considera igual a la cantidad de agua utilizada para el lavado.

3.5.4. Inactivación enzimática

Para esta etapa se utilizó la cantidad de 500 g de agua.

Figura 3-9 Etapa de inactivación enzimática



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

D_3 = Cantidad de agua para la inactivación enzimática 500 g

D_4 = Cantidad de agua residual de la inactivación 396 g

G = Cantidad de cáscara tratada húmeda

Balance para el bloque IV:

$$E + D_3 = G + D_4 \quad \text{Ec. (3-2)}$$

De la ecuación (3-2):

$$G = 204 \text{ g}$$

3.5.5. Hidrólisis ácida

En esta etapa se utilizó la misma cantidad de agua destilada que en la etapa de inactivación enzimática. Se agregó HCl 1 N al agua destilada con la cáscara tratada húmeda para ajustar el pH, el cual presenta un pH de 4,86, de manera que, se necesitó 8 ml de HCl 1 N para disminuir el pH hasta un valor de 1,5.

Se consideró una densidad de HCl 1 N de 1,02 g/ml, por lo tanto, se tiene una masa de HCl 1 N de:

$$\rho = \frac{m_{HCl}}{V_{HCl}} \quad \text{Ec. (3-3)}$$

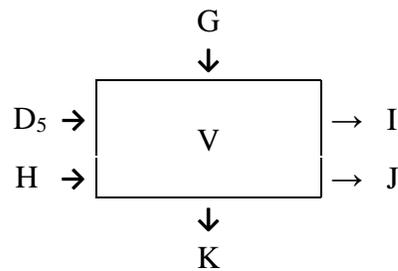
De la ecuación (3-3):

$$m_{HCl} = \rho * V_{HCl}$$

$$m_{HCl} = 1,02 \frac{g}{ml} * 8 ml$$

$$m_{HCl} = 8,16 g$$

Figura 3-10 Etapa de hidrólisis ácida



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

D_5 = Cantidad de agua para la hidrólisis ácida	500 g
H = Cantidad de ácido clorhídrico	8,16 g
I = Bagazo	145,323 g
J = Masa de solución evaporada	
K = Solución de pectina diluida	424,12 g

Balance para el bloque V

$$D_5 + H + G = I + J + K \quad \text{Ec. (3-4)}$$

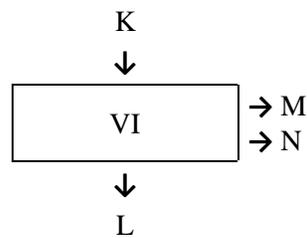
De la ecuación (3-4):

$$J = 142,717 g$$

3.5.6. Filtración

Se separó los restos de bagazo de cáscara de maracuyá de la solución de pectina diluida.

Figura 3-11 Etapa de filtración



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

M = Restos de bagazo 8,55 g

N = Masa de pérdida por filtración

L = Solución de pectina diluida filtrada 413,24 g

Balance para el bloque VI

$$K = M + N + L \quad \text{Ec. (3-5)}$$

De la ecuación (3-5)

$$N = 2,33 \text{ g}$$

3.5.7. Precipitación

La pectina diluida se precipitó utilizando etanol al 96 % con una relación del 80 % del volumen de la solución.

Se determinó un volumen de 418 ml de solución de pectina, por lo tanto, el volumen de etanol al 96 % es de:

$$V_{\text{etanol}} = V_{\text{solución}} * 0,8 \quad \text{Ec. (3-6)}$$

$$V_{\text{etanol}} = 418 \text{ ml} * 0,8$$

$$V_{etanol} = 334,4 \text{ ml}$$

Según bibliografía se consideró una densidad del etanol al 96 % de 0,805 g/ml a 20 °C, por lo tanto, la masa utilizada para esta etapa es de:

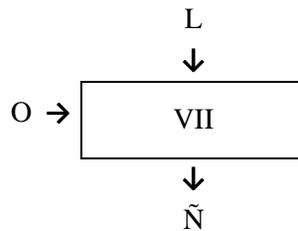
$$\rho = \frac{m_{etanol}}{V_{etanol}} \quad \text{Ec. (3-7)}$$

$$m_{etanol} = \rho * V_{etanol}$$

$$m_{etanol} = 0,805 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 334,4 \text{ ml}$$

$$m_{etanol} = 269,19 \text{ g}$$

Figura 3-12 Etapa de precipitación



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

O = Cantidad de etanol para precipitación 269,19 g

Ñ = Pectina húmeda + solución ácida residual

Balance para el bloque VII

$$L + O = \tilde{N} \quad \text{Ec. (3-8)}$$

De la ecuación (3-8):

$$\tilde{N} = 682,43 \text{ g}$$

3.5.8. Centrifugación

En esta etapa se separó la pectina húmeda de la solución ácida residual.

El volumen separado de la solución ácida es de 574 ml, para transformar a masa se determinó la densidad de dicha solución en laboratorio. Para esto se miden 10 ml de solución y se pesó.

Cálculo de la densidad de la solución ácida residual:

$$\rho_{\text{solución ácida}} = \frac{m_{\text{solución ácida}}}{V_{\text{solución ácida}}} \quad \text{Ec. (3-9)}$$

Masa solución ácida = 9,28 g

Volumen solución ácida = 10 ml

De la ecuación (3-9):

$$\rho_{\text{solución ácida}} = \frac{9,28 \text{ g}}{10 \text{ ml}}$$

$$\rho_{\text{solución ácida}} = 0,928 \text{ g/ml}$$

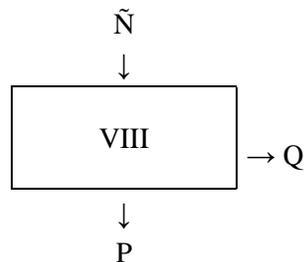
Cálculo de la masa de la corriente de solución ácida residual “O”

$$Q = V_{\text{solución ácida}} * \rho_{\text{solución ácida}}$$

$$Q = 574 \text{ ml} * 0,928 \text{ g/ml}$$

$$Q = 532,67 \text{ g}$$

Figura 3-13 Etapa de centrifugación



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

Q = Solución acida residual + pérdida por centrifugación 532,67 g

P = Pectina húmeda

Balance para el bloque VIII

$$\tilde{N} = P + Q \quad \text{Ec. (3-10)}$$

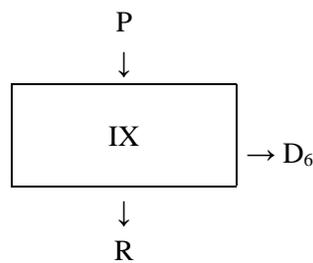
De la ecuación (3-10):

$$P = 149,76 \text{ g}$$

3.5.9. Secado

En esta etapa se eliminó el agua hasta obtener un peso constante de pectina seca.

Figura 3-14 Etapa de secado



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

D_6 = Cantidad de agua evaporada

R = Pectina seca 1,898 g

Balance para el bloque IX

$$P = R + D_6 \quad \text{Ec. (3-11)}$$

De la ecuación (3-11):

$$D_6 = 147,862 \text{ g}$$

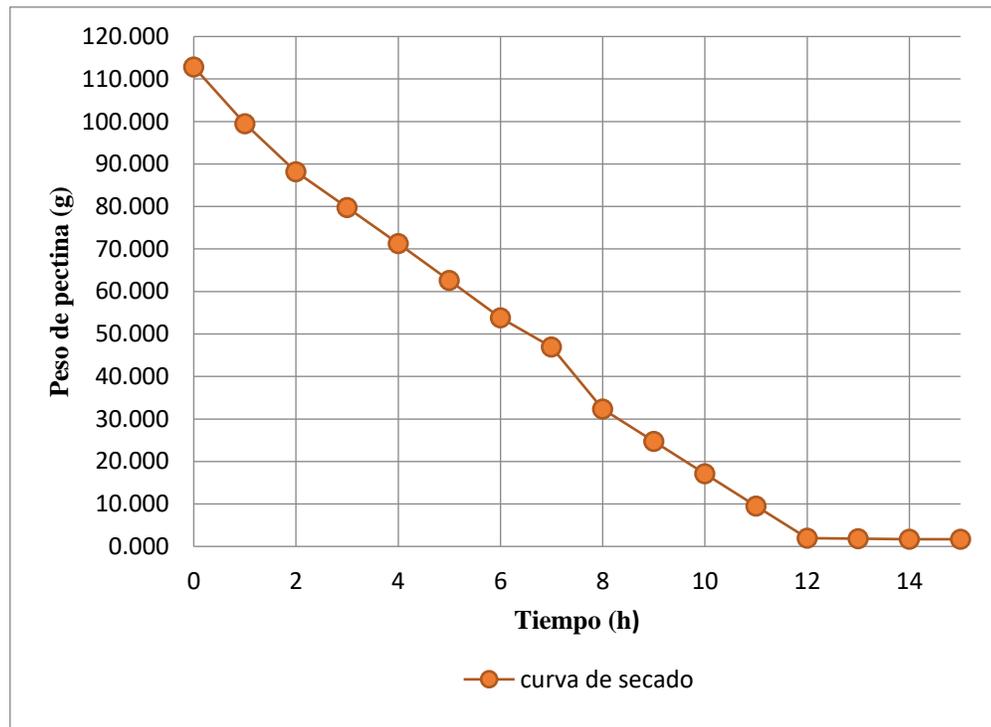
Se construyó una curva de secado de la pectina húmeda, en la cual se registra el peso a intervalos de una hora hasta obtener un peso constante del producto. En la tabla III-15 se detallan los datos de la pérdida de peso de la pectina extraída en el proceso de secado a temperatura constante.

Tabla III-15 Datos de pérdida de peso en función del tiempo a temperatura constante de 45 ± 2 °C

Tiempo (h)	Peso de la pectina (g)
0	112,866
1	99,506
2	88,176
3	79,736
4	71,296
5	62,633
6	53,802
7	46,940
8	32,333
9	24,732
10	17,130
11	9,529
12	1,927
13	1,813
14	1,698
15	1,698

Fuente: Elaboración propia, 2023

Figura 3-15 Curva de secado de la pectina a temperatura constante de $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

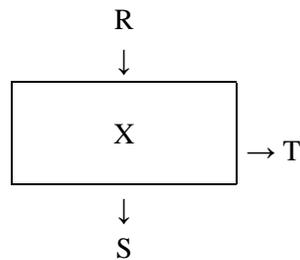


Fuente: Elaboración propia, 2023

3.5.10. Molienda

En la molienda se registró una pérdida de pectina:

Figura 3-16 Etapa de molienda



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

T = Cantidad de pectina perdida en la molienda

S= Pectina seca molida 1,778 g

Balance para el bloque X

$$R = S + T \quad \text{Ec. (3-12)}$$

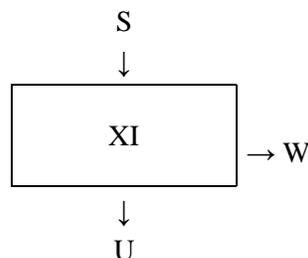
De la ecuación (3-12):

$$T = 0,12 \text{ g}$$

3.5.11. Tamizado y envasado

En el tamizado se registró una pérdida de 0,08 g de pectina.

Figura 3-17 Etapa de tamizado y envasado



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

W = Cantidad de pectina perdida en el tamizado 0,08 g

U = Pectina seca tamizada

Balance para el bloque XI

$$S = W + U \quad \text{Ec. (3-13)}$$

De la ecuación (3-13):

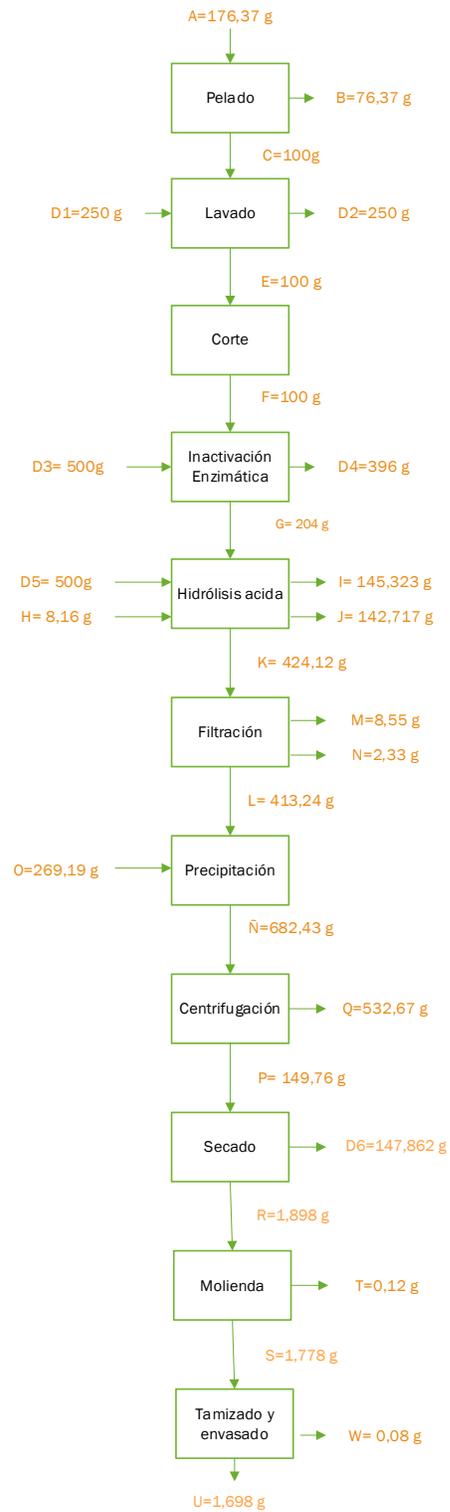
$$U = 1,698 \text{ g}$$

El producto final es de 1,698 g de pectina obtenido de 100 g de cáscara de maracuyá, posteriormente se envasó en una bolsa de polietileno de alta densidad apta para insumos alimenticios.

3.5.12. Resumen del balance de materia del proceso de extracción

A continuación, en la figura se muestra el resumen del balance de materia realizado con los resultados obtenidos:

Figura 3-18 Resumen del balance de materia del proceso de extracción



Fuente: Elaboración propia, 2024

3.6. Balance de energía para el proceso de extracción de pectina de cáscara de maracuyá

3.6.1. Etapa de inactivación enzimática

Esta etapa se realizó en el calentador – agitador magnético entre una temperatura de (90 – 95 °C) por un periodo de 20 min con un peso de materia de 100 g de cáscara de maracuyá.

$$E_{\text{Calentador}} = P_C * t \quad \text{Ec. (3-14)}$$

Donde:

$E_{\text{Calentador}}$ = Energía del calentador – agitador magnético

t = Tiempo = 0,33 h

P_C = Potencia del calentador – agitador magnético = 0,64 kW

$$E_{\text{Calentador}} = 0,64 \text{ kW} * 0,33 \text{ h}$$

$$E_{\text{Calentador}} = 0,21 \text{ kW-h}$$

La energía consumida en la etapa de inactivación enzimática en kJ es de:

$$E_{\text{Calentador}} = 0,211 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Calentador}} = 760,32 \text{ kJ}$$

3.6.2. Etapa de hidrólisis ácida

Esta etapa se desarrolló en el calentador – agitador magnético a una temperatura de 80 °C por un lapso de 90 min.

$$E_{\text{Calentador}} = P_C * t \quad \text{Ec. (3-15)}$$

Donde:

$E_{\text{Calentador}}$ = Energía del calentador – agitador magnético

t = Tiempo = 1,5 h

P_C = Potencia del calentador – agitador magnético = 0,64 kW

$$E_{\text{Calentador}} = 0,64 \text{ kW} * 1,5 \text{ h}$$

$$E_{\text{Calentador}} = 0,96 \text{ kW-h}$$

La energía consumida en la etapa de hidrólisis ácida en kJ es de:

$$E_{\text{Calentador}} = 0,96 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Calentador}} = 3456 \text{ kJ}$$

3.6.3. Etapa de filtración

En esta parte se separó la solución hidrolizada del bagazo, se realizó empleando una bomba de vacío conectada a un matraz Kitasato con un embudo Büchner por un lapso de 60 min.

$$E_{\text{Bomba}} = P_b * t \quad \text{Ec. (3-16)}$$

Donde:

E_{Bomba} = Energía de la bomba de vacío

t = Tiempo = 1,5 h

P_b = Potencia de la bomba de vacío = 0,23 kW

$$E_{\text{Bomba}} = 0,23 \text{ kW} * 1,5 \text{ h}$$

$$E_{\text{Bomba}} = 0,345 \text{ kW-h}$$

La energía consumida en la etapa de filtración en kJ es de:

$$E_{\text{Bomba}} = 0,345 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Bomba}} = 1242 \text{ kJ}$$

3.6.4. Etapa de centrifugación

En esta parte se separó la solución ácida residual de la pectina húmeda utilizando la centrifugadora por un lapso de 45 min.

$$E_{\text{Centrifuga}} = P_{\text{Centrifuga}} * t \quad \text{Ec. (3-17)}$$

Donde:

$E_{\text{Centrifuga}}$ = Energía de la centrifugadora

t = Tiempo = 0,75 h

$P_{\text{Centrifuga}}$ = Potencia de la centrifugadora = 0,52 kW

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,52 \text{ kW} * 0,75 \text{ h}$$

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,39 \text{ kW-h}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugación en kJ es de:

$$E_{\text{Centrifuga}} = 0,39 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Centrifuga}} = 1404 \text{ kJ}$$

3.6.5. Etapa de secado

Esta etapa se realizó en la incubadora a una temperatura de $45 \pm 2^\circ\text{C}$ por un lapso de 20 h, se realizó el secado hasta obtener un peso constante de la pectina.

$$E_{\text{Secador}} = P_{\text{Secador}} * t \quad \text{Ec. (3-18)}$$

Donde:

E_{Secador} = Energía del secador (incubadora)

t = Tiempo = 20 h

P_{Secador} = Potencia del secador (incubadora) = 2,2 kW

$$E_{\text{Secador}} = 2,2 \text{ kW} * 20 \text{ h}$$

$$E_{\text{Secador}} = 44 \text{ kW-h}$$

La energía consumida en la etapa de secado en kJ es de:

$$E_{\text{Secador}} = 44 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Secador}} = 158400 \text{ kJ}$$

3.6.6. Etapa de tamizado

En esta etapa las partículas más pequeñas pueden pasar a través de los poros del tamiz, mientras que las partículas más grandes son retenidas. Se realizó en un tiempo de 10 min.

$$E_{\text{Tamizador}} = P_{\text{Tamizador}} * t \quad \text{Ec. (3-19)}$$

Donde:

$E_{\text{Tamizador}}$ = Energía del tamizador

t = Tiempo= 0,16 h

$P_{\text{Tamizador}}$ = Potencia del tamizador = 0,12 kW

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,12\text{kW} * 0,16 \text{ h}$$

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,02 \text{ kW-h}$$

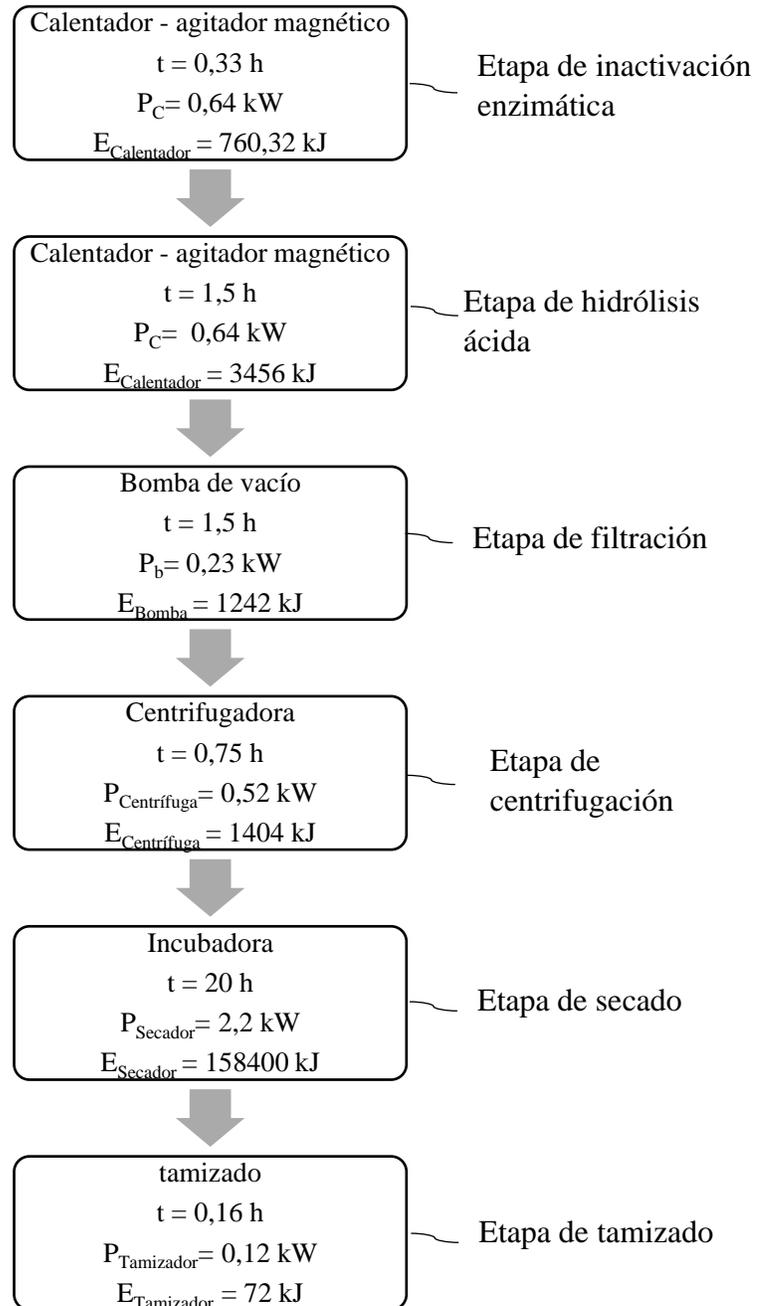
La energía consumida en la etapa del tamizado en kJ es de:

$$E_{\text{Tamizador}} = 0,02 \text{ kW-h} * 3600 \text{ kJ / kW-h}$$

$$E_{\text{Tamizador}} = 72 \text{ kJ}$$

3.6.7. Resumen del balance de energía del proceso de extracción de pectina de la cáscara de maracuyá

Figura 3-19 Resumen del balance de energía del proceso de extracción de pectina



Fuente: Elaboración propia, 2024

Entonces el valor de energía consumido en total es la suma; $760,32 + 3456 + 1242 + 1404 + 158400 + 72 = 165334,32$ kJ. Para procesar 100 g de cáscara de maracuyá para producir 1,698 % de pectina.

3.7. Cálculo del rendimiento definitivo

Se calculó el rendimiento del proceso de obtención de pectina a partir de la cáscara de maracuyá utilizada para la extracción y la cantidad de pectina obtenida como producto final.

$$Rendimiento (\%) = \frac{m_{Pectina}}{m_{cáscara}} * 100 \quad \text{Ec. (3-20)}$$

Dónde:

$$m_{Pectina} = 1,698 \text{ g}$$

$$m_{Cáscara} = 100 \text{ g}$$

De la ecuación (3-20):

$$Rendimiento (\%) = \frac{1,698 \text{ g}}{100 \text{ g}} * 100$$

$$Rendimiento (\%) = 1,698 \%$$

Entonces el rendimiento del proceso de extracción con los parámetros óptimos es 1,698 %

3.8. Evaluación de costos

Para determinar el costo de la investigación se realizó la evaluación de costos directos e indirectos, que se realizan durante la elaboración de todo el proyecto.

Tabla III-16 Detalle de costos de materias primas y reactivos

N°	ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO (Bs)
1	Materia prima	Maracuyá	c/u	3	67	201
2	Reactivos para el proceso	Ácido clorhídrico 1 N	l	260	0,66	171,6
3		Etanol al 96 %	l	10	30	300
4		Agua destilada	l	4	82	328
5	Reactivos para el análisis	Hidróxido de sodio 0,1 N	l	80	0,15	12
6		Hidróxido de sodio 0,25 N	l	80	0,15	12
7		Ácido clorhídrico 0,25 N	l	65	0,15	9,75
8		Sacarosa	kg	5	0,5	2,5
Total						1036,85

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-17 Detalle de costos de materiales empleados en la extracción de pectina

N°	ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD/ TAMAÑO	VALOR UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO (Bs)
1	Vasos de precipitado	Vidrio borosilicato	1000 ml	80	3	240
2	Vasos de precipitado	Vidrio borosilicato	250 ml	35	3	105
3	Probetas	Vidrio borosilicato	100 ml	50	1	50
4	Probetas	Vidrio borosilicato	25 ml	40	1	40
5	Probetas	Plástico	250 ml	42	1	42
6	Embudo Büchner	Porcelana	Grande	Disponible en el LOU	1	-----
7	Vidrio reloj	Vidrio pyrex	Grande	21	2	42
8	Espátula	Metal	pequeña	20	1	20
9	Matraz Erlenmeyer	Vidrio borosilicato	250 ml	Disponible en el LOU	2	-----
10	Matraz Kitasato	Vidrio borosilicato	1000 ml	Disponible en el LOU	1	-----
11	Bureta	Vidrio borosilicato	50 ml	Disponible en el LOU	1	-----
12	Caja Petri	Vidrio borosilicato	100 mm	15	4	60
13	Varilla	Vidrio pyrex	Mediano	23	2	46
14	Mortero	Porcelana	Mediano	60	1	60
15	Cuchillo	Acero inoxidable	Mediano	5	1	5
16	Termómetro	de Hg	-10 a 200 °C	42	1	42
17	Papel filtro	-----	pliegue	8	17	136
18	Frasco lavador	Plástico	800 ml	12	1	12
Total						900

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-18 Detalle de costos de análisis fisicoquímico de la materia prima y pectina extraída

N°	ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO (Bs)
1	Materia prima	Acidez	20	1	20
2		Cenizas	28	1	28
3		Humedad	16	1	16
4		Sólidos solubles	8	1	8
5		pH (20°)	8	1	8
6	Producto	Cenizas	28	1	28
7		Humedad	16	1	16
8		pH (20°)	8	1	8
9		Bacterias aerobias mesófilas	40	1	40
10		Coliformes totales	40	1	40
Total					212

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-19 Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos

N°	ÍTEM	UNIDAD	VALOR UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO (Bs)
1	Investigación en internet	mes	100	6	600
2	Impresión	hoja	0,5	1500	750
3	Anillados	anillado	15	4	60
4	Empastados	empastado	50	3	150
5	Trasporte diario	día	4	90	360
Total					1920

Fuente: Elaboración propia, 2024

La evaluación de los costos totales se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-20 Detalle de costos totales

N°	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Detalle de costos de materia prima y reactivos	1036,85
2	Detalle de costos de materiales empleados en la extracción de pectina	900
3	Detalle de costos de análisis fisicoquímico de la pectina extraída	212
4	Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos	1920
Total		4068,85

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.9. Determinación del costo de producción de pectina a escala laboratorio

A partir de los balances de materia y energía se estimó el costo de producción de la extracción de pectina a partir de la cáscara de maracuyá.

De los 100 g de cáscara de maracuyá utilizados se extraen aproximadamente 1,698 g de pectina.

Para estimar los costos de energía eléctrica se toma como dato referencial 0,980 Bs. el costo del kW-h que es la tarifa de electricidad en Bolivia.

Tabla III-21 Detalle de costos de materia prima y reactivos

N°	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO (Bs)
1	Maracuyá	c/u	3	1	3
2	Agua destilada para inactivación enzimática	l	4	0,5	2
3	Agua destilada para hidrólisis ácida	l	4	0,5	2
4	Ácido clorhídrico	l	260	0,008	2,08
5	Etanol al 96 %	l	10	0,335	3,35
Total					12,43

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-22 Detalle de costos de requerimiento energético

N°	Etapa	Equipos	Energía (kW-h)	Costo global (Bs)
1	Inactivación enzimática	Calentador-agitador magnético	0,21	0,2058
2	Hidrólisis ácida	Calentador-agitador magnético	0,96	0,9408
3	Filtración	Bomba de vacío	0,345	0,3381
4	Centrifugación	Centrifugadora	0,39	0,3822
5	Secado	Incubadora	44	43,12
6	Tamizado	Tamizador	0,02	0,0196
Total				45,0065

Fuente: Elaboración propia, 2024

El costo de producción para extraer pectina a partir de 100 g de cáscara de maracuyá es el siguiente:

Tabla III-23 Detalle de costos de producción

N°	DESCRIPCIÓN	TOTAL (Bs)
1	Detalle de costos de materia prima y reactivos	12,43
2	Detalle de costos de requerimiento energético	45,0065
Total		57,4365

Fuente: Elaboración propia, 2024

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. Es posible obtener pectina de la cáscara de maracuyá producida en el departamento de Tarija para el aprovechamiento industrial de los residuos de la misma, tal como se observa en esta investigación se obtuvo un 1,698 g de pectina a partir de 100 g de cáscara.
2. Se utilizó la cáscara del maracuyá procedente del departamento de Tarija, los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados por el CEANID son: acidez (como ac. Cítrico): 0,43 %, cenizas 1,24 %, humedad 84,28 %, sólidos solubles 3,80 y un pH de 4,64.
3. Después de analizar los diferentes procesos tecnológicos experimentales para la extracción de pectina a partir de la cáscara de maracuyá, se ha determinado que el proceso más viable es la extracción por hidrólisis ácida convencional. Las variables de operación más influyentes en el proceso de extracción de pectina son: pH ya que a un pH bajo favorece la extracción de pectina; La temperatura mientras sea más alta aumentan el rendimiento de pectina y tiempo de extracción: Tiempos intermedios permiten una extracción eficiente.
4. Después de llevar a cabo la fase experimental de extracción de pectina a partir de la cáscara de maracuyá a nivel de laboratorio, se han obtenido resultados favorables que demuestran el potencial de esta materia prima como fuente de pectina.
5. La pectina extraída presenta un grado de esterificación de 63,27 %, por lo tanto, se obtuvo una pectina de alto metoxilo. El grado de gelificación de la pectina extraída es de 66,67 °SAG, el cual se demostró una gelificación rápida, es decir, menor a 5 min. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados por el CEANID demostraron que la pectina obtenida a partir de la cáscara de maracuyá está dentro de los parámetros de una pectina comercial.
6. Las condiciones óptimas de extracción de la pectina fueron: pH 1,5, temperatura 80 °C, tiempo 90 min y se obtuvo un rendimiento del 1,698 % a partir de la cáscara del maracuyá.

7. El costo de la obtención experimental de pectina de la cáscara del maracuyá a escala laboratorio es de 57,43 Bs por 1,698 g.

4.2. Recomendaciones

1. Se recomienda que el presente estudio sirva como guía para generar más estudios acerca de las diferentes fuentes donde se pueda extraer pectina con el fin de aprovechar más residuos del sector agrícola.

2. Realizar la extracción de pectina por el método de hidrólisis ácida empleando otro reactivo para su extracción como ácido cítrico, ácido fosfórico, ácido nítrico, etc.

3. Realizar la extracción de pectina por otros métodos como la extracción por medio de enzimas u otro método alternativo y comparar el rendimiento y las características fisicoquímicas de la pectina obtenida.

4. Estudiar métodos de secado alternativos debido a que este método resulta muy costoso para el proceso.

5. Se debe analizar las condiciones que favorezcan el correcto almacenamiento de las cáscaras ya que de lo contrario se puede provocar reacciones enzimáticas y cambios en la estructura de las moléculas con lo que disminuye el contenido de pectina de las cáscaras.

6. Realizar un análisis detallado de la viabilidad económica, financiera y técnica para la instalación de una planta piloto para la extracción de pectina en la provincia Cercado, del departamento de Tarija o en los departamentos de mayor producción de maracuyá a nivel nacional, y así poder reducir las importaciones.