



**DISEÑO DE UN PROCESO DE CONCENTRACIÓN DE JUGO DE MARACUYÁ EMPLEANDO
EVAPORACIÓN OSMÓTICA**

PRESENTADO POR:

DANIEL ANDRÉS MURCIA RAMÍREZ

JOSÉ DAVID MURCIA CABRERA

DIRECTOR:

CLAUDIA ISABEL OCHOA

CO-DIRECTOR:

CARLOS ANTONIO VÉLEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

**PROPUESTA DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS
DE ALIMENTOS**

SANTIAGO DE CALI

2023

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado a mi madre María del Pilar Murcia, que con su gran esfuerzo siempre me inculcó soñar en ser profesional a pesar de las dificultades y que con su apoyo me ayudó a llegar hasta este momento.

A mis hermanos, mis ejemplos de vida, me enseñaron que solo se necesita soñar y esforzarte para llegar lejos en la vida, rompiendo paradigmas de esta sociedad.

José D. Murcia Cabrera

Dedicado a mis padres Omaira Ramírez y Rosemberg Murcia. A mi hermano Gabriel Murcia. Me dieron todo, les debo todo.

A mis amigos y familiares. Siempre a hombros de gigantes.

Daniel A. Murcia Ramírez

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que entre tantas dificultades se esforzó por darme la oportunidad de formarme como profesional con todo su amor y apoyo.

A nuestros maestros Claudia Isabel Ochoa y Carlos Vélez por su conocimiento y apoyo constante brindado para la realización de este Trabajo de Grado.

A la Universidad del Valle en especial a la Escuela de Ingeniería de Alimentos por formarnos como personas y profesionales para la sociedad.

A La Tour por abrirnos sus puertas para el desarrollo experimental de este Trabajo de Grado.

José D. Murcia Cabrera

A todos.

Daniel A. Murcia Ramírez

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Generalidades del maracuyá (<i>Passiflora edulis</i>).....	9
2.2. Jugo (zumو) de fruta	10
2.3. Concentrado de jugo de fruta	10
2.4. Proceso de concentración de jugos de fruta por evaporación osmótica (EO)	11
2.4.1. Enzimación	12
2.4.1.1. Enzimas hidrolíticas	12
2.4.2. Métodos de clarificación	15
2.4.2.1. Centrifugación.....	15
2.4.2.2. Filtración por membranas	15
2.4.3. Evaporación osmótica	16
3. ANTECEDENTES	19
4. PROBLEMÁTICA	25
5. JUSTIFICACIÓN	25
6. OBJETIVOS.....	26
6.1. Objetivo general.....	26
6.2. Objetivos específicos	26
7. MATERIALES Y MÉTODOS	26
7.1. Material vegetal	26
7.2. Tratamiento enzimático	27
7.3. Centrifugación.....	28
7.4. Evaporación osmótica.....	28
7.5. Análisis fisicoquímicos	30
8. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	30
8.1. Tratamiento enzimático	30
8.2. Centrifugación.....	32
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
9.1. Material vegetal	32
9.2. Tratamiento enzimático	34
9.2.1. Efecto individual	34

9.2.2. Efecto combinado de las enzimas	36
9.2.3. Linealidad del tratamiento enzimático	39
9.3. Clarificación.....	39
9.3.1. Centrifugación.....	40
9.3.2. Filtración.....	40
9.4. Proceso de evaporación osmótica	43
9.4.1. Montaje del sistema de evaporación osmótica.....	43
9.4.2. Verificación del montaje.....	45
10. CONCLUSIONES.....	46
REFERENCIAS.....	48
ANEXOS.....	54

Listado de tablas

Tabla 1. Clasificación de membranas de acuerdo con el tamaño de poro y presiones de operación	16
Tabla 2. Procesos para la clarificación y concentración de jugos de fruta empleando evaporación osmótica	19
Tabla 3. Especificaciones técnicas para la aplicación de las enzimas	27
Tabla 4. Condiciones de proceso de EO	29
Tabla 5. Diseño experimental para la determinación del efecto de enzimas por separado	31
Tabla 6. Parámetros empleados para la construcción del diseño experimental	31
Tabla 7. Plan de experimentos	32
Tabla 8. Diseño experimental para la determinación de la linealidad del efecto de las enzimas	32
Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del efecto de las enzimas por separado	34
Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de las enzimas por separado	35
Tabla 11. Diseño experimental y respuestas generadas por la enzimación del jugo de maracuyá	37
Tabla 12. ANOVA para el efecto de las concentraciones de enzima sobre los sólidos solubles y viscosidad	37
Tabla 13. Diseño experimental y respuestas generadas por la enzimación del jugo de maracuyá en prueba de linealidad	39
Tabla 14. Prueba de Tuckey para tiempos de centrifugación	40
Tabla 15. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá en diferentes etapas del proceso	41
Tabla 16. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá con respecto a otros trabajos de clarificación	42
Tabla 17. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá con respecto a otros trabajos de evaporación osmótica	43
Tabla 18. Características de la membrana utilizada en el sistema de EO	43
Tabla 19. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá #2 en diferentes etapas del proceso de concentración	45

Listado de figuras

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso convencional para obtención de concentrados por EO	11
Figura 2. Estructura química de la celulosa	13
Figura 3. Estructura básica de la pectina	14
Figura 4. Estructura química de la xilana	14
Figura 5. Esquema del proceso de separación por membranas	15
Figura 6. Sistema de evaporación osmótica	17
Figura 7. Principio del proceso de evaporación osmótica	17
Figura 8. Geometría del módulo Liqui-Cel EXF-4x13	28
Figura 9. Operaciones unitarias para la obtención de concentrado de maracuyá	30

Figura 10. Diagrama de bloques de las operaciones para obtención de jugo	33
Figura 11. Esquema del sistema de evaporación osmótica	44
Figura 12. Sistema de evaporación osmótica a escala de laboratorio	44
Figura 13. Jugo de maracuyá en diferentes etapas del proceso (A) despulpado, (B) enzimado, (C) clarificado, (D) concentrado	45

RESUMEN

La concentración de jugos es la remoción de agua con la finalidad de aumentar su vida útil, facilitar el almacenamiento y transporte. Generalmente se realiza por procesos de evaporación, pero el uso de temperaturas elevadas degrada los compuestos termolábiles del jugo. La evaporación osmótica en una operación con membranas que se establece como alternativa al proceso de evaporación convencional para el procesamiento de frutas, puesto que puede llevarse a cabo a temperaturas entre 20 y 40 °C y presión atmosférica, produciendo concentrados con alto contenido de sólidos solubles y características nutricionales y sensoriales similares al fruto original, pero su uso requiere de pretratamientos como tratamiento enzimático y clarificación para obtener las características mecánicas y fisicoquímicas necesarias para su procesamiento. El objetivo de este trabajo de grado fue diseñar un proceso de concentración de jugo de maracuyá empleando evaporación osmótica.

Se determinó que el rendimiento en el proceso de obtención de jugo fue mayor en la operación de despulpado con respecto a la operación de licuado, debido a la reducción del número de etapas de filtración para remover las semillas, además, permite obtener mejores características fisicoquímicas en el jugo para su posterior procesamiento. El jugo fue clarificado enzimáticamente con los cocteles enzimáticos Natuzym SF y Depol 40L, se caracterizó su efecto lineal con respecto a la cantidad de jugo, el efecto individual de cada coctel y el efecto combinado, seleccionando la combinación que entregue mejores características fisicoquímicas del jugo y permitió utilizar menor cantidad de enzimas. La clarificación se llevó a cabo por centrifugación durante 5 minutos a 5000 rpm acompañada de una etapa de filtración al vacío a través de un filtro cualitativo de 8 µm, permitiendo reducir la viscosidad y la turbidez en 84.68% y 98.80%, respectivamente. Finalmente, a través de una corrida de verificación del sistema de evaporación osmótica construido se obtuvo concentrado de maracuyá con un contenido final de sólidos solubles de 63.8°Brix.

Palabras clave: *Maracuyá, concentración, tratamiento enzimático, centrifugación, evaporación osmótica.*

1. INTRODUCCIÓN

La maracuyá es una fruta exótica propia de climas tropicales y subtropicales. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2021; 2023) en Colombia, se produce en 24 de los 32 departamentos, sobresaliendo en las zonas secas y calientes, como Antioquia, Huila, Meta, Valle del Cauca, Santander y Arauca. Este fruto abarca el 35% del área sembrada a nivel nacional de pasifloras, siendo el departamento de Huila el líder en área de siembra y Antioquia en producción. Según Agronet la producción de maracuyá en Colombia en 2020 fue de 166 mil toneladas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

El consumo de jugo de frutas es benéfico para la salud, ya que es un alimento libre de lípidos como el colesterol y rico en antioxidantes. Los jugos están constituidos por 80 - 90% de agua, minerales, vitaminas y demás nutrientes favorables provenientes de la fruta (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013; Ruilova-Carrión et al., 2018). El alto contenido de agua dificulta su almacenamiento por la poca estabilidad microbiológica (Alfaro et al., 2019). Una solución a los problemas de estabilidad de los jugos es la concentración, que consiste en la eliminación por medios físicos del agua hasta elevar el contenido de sólidos solubles totales en un 50% más que el valor del jugo en su estado natural (CODEX STAN 275, 2005).

La evaporación es uno de los métodos más comúnmente utilizados para concentrar jugos de frutas. Este método afecta la calidad de los jugos debido a que utiliza calor y, por otra parte, la concentración final de sólidos es muy baja (del orden de 30 °Brix) (Gómez-Caturla, 2019). Los jugos contienen nutrientes termolábiles, es decir, durante la evaporación los atributos que son índice de la calidad del jugo sufren alteraciones como consecuencia del daño térmico y las reacciones oxidativas que degrada a los componentes más sensibles (Cassano & Drioli, 2007). Una alternativa a los procesos térmicos para concentrar jugos es la tecnología de membrana. Esta tecnología se fundamenta en el intercambio de materia por procesos osmóticos reteniendo gran parte de los sólidos disueltos en el fluido mediante filtración (Roncancio-Parra, 2015).

Dentro de la tecnología de membranas existen diferentes técnicas de filtración que se clasifican de acuerdo con la fuerza impulsora y el tamaño de poro. La microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa utilizan diferenciales de presión para el paso de materia, caso contrario ocurre con los procesos de destilación por membrana y sus variantes (pervaporación y evaporación osmótica) donde utilizan diferencias en la concentración (potencial químico)

(Camacho, 2010). Una de las desventajas del uso de membranas en jugos es la pérdida de flujo por ensuciamiento (Hermosa-Díaz, 2021), por tal motivo, para su uso en matrices complejas se requiere de pretratamientos como tratamientos enzimáticos, centrifugación y filtración (Chan & Chiang, 1992).

El diseño de un proceso de concentración empleando evaporación osmótica implica el acoplamiento de diferentes etapas que permitan la transformación de la materia prima para obtener un producto final con mínimo de daño de sus propiedades fisicoquímicas. La evaporación osmótica es un proceso atérmico que permite la retención de compuestos volátiles y minimiza los daños (Kumar et al., 2020; Tavares et al., 2022), y entre sus desventajas se encuentra la interpretación en los resultados y la especificidad del montaje (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013). Este trabajo de grado propone bases para el diseño y montaje de un proceso de concentración de jugo de frutas tropicales pulposas por evaporación osmótica y su aplicación en jugo de maracuyá.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del maracuyá (*Passiflora edulis*)

El maracuyá es una fruta exótica originaria de Brasil. Posteriormente se extendió a otros países como Ecuador, Perú, Colombia, y demás países de clima tropical y subtropical (Arias-Domínguez et al., 2019; Durán-Salazar & Alcívar-Mayor, 2020). Se caracteriza por ser un fruto vistoso de color amarillo, con forma ovoide, intenso sabor y alta acidez, siendo atractivo al consumidor debido a que es una fuente importante de macronutrientes como carbohidratos, ácidos grasos y proteínas, al igual que algunos micronutrientes como vitaminas y minerales, donde destacan la vitamina C, el fósforo y los carotenoides, que a su vez son responsables de funciones biológicas, como la actividad antioxidante (Calderón & Morán, 2017; Cerquera-Peña et al., 2012; Valencia et al., 2015).

Según el Ministerio de Agricultura, en el año 2019 el área dedicada al cultivo de pasifloras en Colombia fue de 18 mil hectáreas, con una producción de 137 mil toneladas (López-Ráez et al., 2021; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). En 2021 las hectáreas cultivables de maracuyá aumentaron a 20 mil y de acuerdo con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, la producción en 2022 fue de 600 mil toneladas. No obstante, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) indicó que los niveles de producción de frutas tropicales a nivel global tenderán a disminuir debido a la escasez de suministros y las condiciones climáticas adversas (i.e temperaturas frías) (FAO, 2023).

2.2. Jugo (zummo) de fruta

El jugo de fruta es un líquido obtenido de las partes comestibles de frutas maduras, sanas y limpias mediante esfuerzos físicos, clarificado o no por procedimientos mecánicos o enzimáticos, conservando las características fisicoquímicas, organolépticas y nutricionales (color, aroma y sabor típico) de la materia prima de la que procede (CODEX STAN 275, 2005; Norma Técnica Colombiana, 2012; Ministerio de Salud y Protección Social, 2013). La evaluación de calidad para los jugos deberá considerar características fisicoquímicas como: pH, acidez titulable, sólidos solubles totales SST (°Brix), contenido de materia seca, proteína, cenizas, vitamina C (ácido ascórbico), azúcares totales y reductores (Rodríguez-Arzave et al., 2020).

En 2022 los jugos de fruta tuvieron un importante valor de mercado para Colombia con importaciones por USD 14.49M y exportaciones por USD 4.77M (Trade Map, 2022). En Colombia los jugos de fruta, en particular el de maracuyá, son una oportunidad de mercado, debido a las tendencias comerciales de jugos en el país y la ventaja competitiva de esta fruta al ser exótica. Actualmente existen productos a base de jugo de maracuyá de empresas como Big Juice Fruits, Cl Global Business y TWS Marketing Group que venden sus productos con precios entre 8000 y 40000 COP por litro.

2.3. Concentrado de jugo de fruta

En los concentrados, las características varían de acuerdo con la normatividad de la región. En Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Salud y Protección Social (Resolución 3929 de 2013) y la Norma Técnica Colombiana (NTC-5468 del 2012), el concentrado de jugo se define como aquel producto elaborado mediante la extracción parcial del agua que constituye al jugo del que procede. La eliminación de agua debe realizarse hasta elevar el contenido de sólidos solubles totales en 50% más del valor del jugo en estado natural, al cual debieron eliminarse sólidos insolubles por medios físicos y/o enzimáticos. De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la calidad de un concentrado de jugo de origen frutal, además de caracterizarse y fundamentarse por las propiedades fisicoquímicas (pH, sólidos solubles totales, color, contenido de micronutrientes, fitonutrientes, entre otros), será medida cualitativamente con la capacidad de reconstitución, puesto que un concentrado de calidad debe reconstituirse adecuadamente al momento de consumo, es decir, la consistencia del producto debe estar de acuerdo con las exigencias del consumidor.

Los concentrados de jugo permiten optimizar las condiciones de almacenamiento y transporte, ya que la eliminación parcial de agua reduce el volumen. Además, el alimento concentrado tiene mayor estabilidad microbiológica, debido a su menor actividad de agua (Torrez-Palazzolo, 2015). De acuerdo con Market.Biz (2023) se espera un incremento del mercado de jugos concentrados entre 2023 y 2032 con una tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC) del 4.9% aumentando su valor desde USD 78036.7M para 2022 hasta USD 116184.4M para el final del periodo estimado, pronóstico que establece al concentrado de maracuyá como una oportunidad de mercado.

2.4. Proceso de concentración de jugos de fruta por evaporación osmótica (EO)

La concentración de jugos es la remoción de agua con la finalidad de aumentar su vida útil, facilitar el almacenamiento y transporte. Comúnmente se realiza por procesos de evaporación donde se somete al jugo a temperaturas entre 55 – 80 °C en las etapas de procesamiento (tratamientos enzimáticos, escaldado, pasteurización y evaporación). En el proceso de evaporación, las temperaturas elevadas generan degradación de las propiedades nutritivas debido a la sensibilidad térmica que tienen las vitaminas y los fitoquímicos presentes en los jugos (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013; Ceballos & González, 2021). Según Tavares et al. (2022), la pérdida de compuestos volátiles y el deterioro del sabor suceden durante los primeros minutos de la evaporación convencional.

Para minimizar los daños que se presentan en el proceso de evaporación convencional y conservar las características organolépticas y nutricionales, la EO es una alternativa debido a que, a diferencia de la evaporación tradicional, se realiza a temperaturas por debajo de 40°C. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso para evaporar osmóticamente.

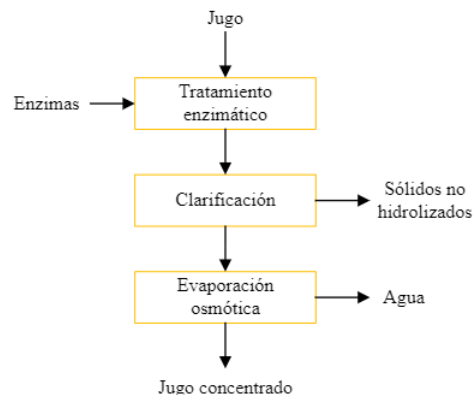


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso convencional para obtención de concentrados por EO

Para reducir la colmatación de las membranas, es necesario clarificar el jugo extraído. Para fracturar las moléculas de alto peso molecular se utilizan enzimas, aumentando así el contenido de sólidos solubles. La remoción de los sólidos insolubles en suspensión puede realizarse por medios físicos utilizando membranas (microfiltros, ultrafiltros), centrifugación o agentes químicos de floculación como gelatina, quitosano, entre otros.

2.4.1. Enzimación

Las enzimas son catalizadores biológicos que están conformados por un componente proteico y también una molécula orgánica denominada coenzima. Su actividad depende de agentes externos como temperaturas extremas, ácidos fuertes, bases, solventes orgánicos u otros que pueden modificar su estructura nativa, desnaturalizándolas e inhibiendo su actividad catalizadora. Las enzimas actúan de forma específica y se clasifican de acuerdo con las reacciones que catalizan (Badui, 2006; Restrepo-Osorio, 2015). Históricamente las enzimas se usan en procesos de fermentación como la fabricación de quesos, vinos, entre otros. Son consideradas aditivos que pueden modificar la apariencia, generar aromas y sabores, alterar la textura y valor nutricional, y además mejoran los procesos químicos tradicionales durante la manufactura alimentaria disminuyendo el tiempo de la etapa (Del Moral et al., 2015; García et al., 2019; Rivera-Pérez & García-Carreño, 2007).

El uso de enzimas para la elaboración de jugos es una solución a los problemas de alta turbidez y viscosidad, y bajos sólidos solubles, puesto que la acción catalítica favorece la ruptura de los enlaces presentes en las moléculas de alto peso molecular responsables del comportamiento fisicoquímico, que, en los jugos, son las pectinas y celulosas (Minchola et al., 2012). La enzimación es una etapa previa a la concentración por métodos térmicos debido al aumento en el contenido de sólidos solubles (Chía-Concepción et al., 2023) y en métodos de clarificación por tecnologías de membrana como la microfiltración y ultrafiltración, donde la enzimación es una etapa necesaria para disminuir el riesgo de colmatación (García-Rujano et al., 2015).

2.4.1.1. Enzimas hidrolíticas

Las enzimas hidrolíticas catalizan las reacciones en las que una sustancia compleja se fracciona en componentes más simples que reaccionan con moléculas de agua. Son las más empleadas durante el procesamiento de frutas para la degradación de

sus tejidos, y su aplicación depende del objetivo tecnológico (Laverde-Acurio et al., 2010), según se describe a continuación:

- Maceración. Es la separación de las células del tejido por lisis. Este método permite conservar la integridad celular, junto con los compuestos intracelulares: vitaminas, carotenoides, entre otros fitoquímicos (Franchi et al., 2015).
- Desintegración. Es la degradación parcial de las paredes celulares.
- Licuefacción. Es la eliminación total de las paredes celulares.

Los tratamientos enzimáticos aplicados en material vegetal están enfocados en la ruptura de las paredes celulares formadas por celulosas, pectinas, lignina, además de contener algunas proteínas, y compuestos fenólicos (Del Moral et al., 2015). Particularmente, los polisacáridos que conforman las paredes celulares están compuestos por ramificaciones de azúcares simples, como se describen a continuación:

- Celulosa: este polisacárido es el principal constituyente de los tejidos vegetales en la naturaleza combinado con xilanos y ligninas. Esta molécula es insoluble en agua; químicamente presenta una estructura lineal de unidades de glucosa enlazadas por uniones beta-1,4 glicosídicos (Restrepo-Osorio, 2015). La Figura 2 presenta la estructura química de la celulosa.

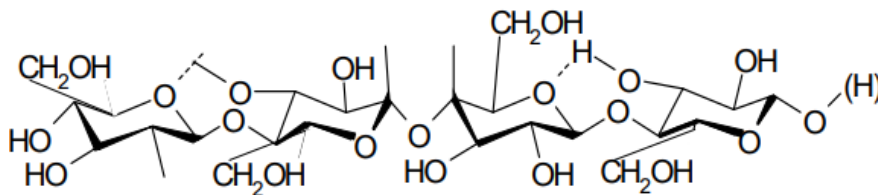


Figura 2. Estructura química de la celulosa

Fuente: (Laverde-Acurio et al., 2010)

- Pectina: es un constituyente mayoritario de los tejidos vegetales. En frutos como el maracuyá este polisacárido constituye alrededor del 69% de las paredes celulares (Urango-Anaya et al., 2018). Son polímeros

estructurales que se presentan en combinación con la celulosa, químicamente presentan una organización lineal del ácido D-galacturónico con enlaces alfa-1,4 glucosídicos y el peso molecular de las sustancias pécticas va desde 10.000 a 400.000 Da. La Figura 3 presenta la estructura química de la pectina.

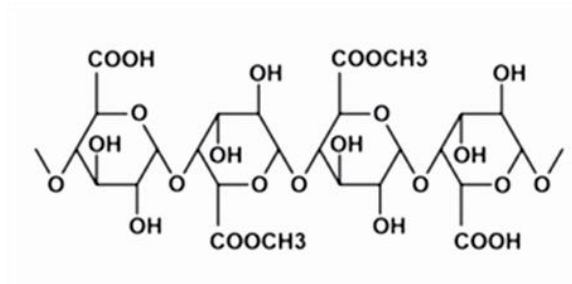


Figura 3. Estructura básica de la pectina

Fuente: (Almeida et al., 2019)

- Hemicelulosa: es un heteropolisacárido cuya frecuencia y composición varía entre el tejido, especie y desarrollo del material vegetal. Las hemicelulosas se encuentran combinadas con lignina y celulosa en las paredes celulares que componen los tejidos fibrosos. Generalmente, son poliurónidos en combinación con arabinosa, glucosa, manosa, galactosa y xilosa. La Figura 4 presenta la estructura química de la xilana, perteneciente al grupo de hemicelulosas.

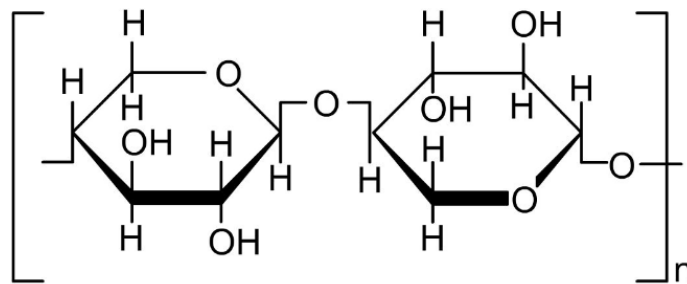


Figura 4. Estructura química de la xilana

Fuente: (Escalante et al., 2021)

2.4.2. Métodos de clarificación

2.4.2.1. Centrifugación

La centrifugación es una técnica física de separación por diferencia de densidades, donde los sólidos que se encuentran dispersos dentro de una fase líquida se sedimentan por la acción de una fuerza gravitacional causada por la aceleración en la rotación (Qin et al., 2021). Es un método convencional utilizado para la clarificación de jugos debido a su baja especificidad respecto a los requerimientos en la matriz de la materia prima. Además, durante la separación la integridad fisicoquímica y composición de la muestra se conserva, ya que a pesar de disminuir la concentración de los componentes no ocurre una pérdida irreversible en la composición nutricional (Ninga et al., 2022).

2.4.2.2. Filtración por membranas

En los procesos de filtración por membrana la corriente de alimentación se divide en el permeado (clarificado), material que logra atravesar la membrana y el retenido (concentrado), material que no atraviesa la membrana. Esta separación depende del peso y tamaño de las moléculas del alimento (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013). En la Figura 5 se presenta el esquema de un proceso de separación por membranas.

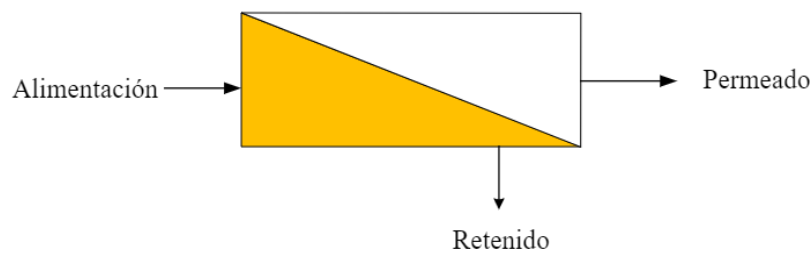


Figura 5. Esquema del proceso de separación por membranas

Adaptado de: (Laverde-Acurio et al., 2010)

Las membranas se clasifican de acuerdo con el tamaño de poro y a su vez, con la presión requerida para forzar el paso de materia a través de ésta, como se muestra en la Tabla 1. Los filtros convencionales son de tamaños superiores a 10 μm , seguidos por los microfiltros, quienes tienen una apertura situada entre 10 y 0.1

μm , y se encuentran los ultrafiltros que retienen moléculas que están entre 0.1 y 0.005 μm (Cuartas-Uribe, 2005). La tecnología de membranas representa una ventaja significativa en la industria en general, ya que permite hacer procesos de forma continua, el consumo energético es bajo y reduce el impacto ambiental al limitar los residuos. Aunque, requiere una inversión inicial alta y un estudio previo a las especificaciones y necesidades del sistema (Solís et al., 2017). La introducción de este tipo de tecnologías a la industria permite la producción de jugos clarificados con alta calidad nutricional, sabor natural y sin aditivos (Tupuna et al., 2016).

Tabla 1. Clasificación de membranas de acuerdo con el tamaño de poro y presiones de operación

Tipo de filtro	Rango de partícula separada (μm)	Rango de presión de operación (bar)
Microfiltración	10 – 0.1	5.0 – 0.1
Ultrafiltración	0.1 – 0.005	1.0 – 20.0
Nanofiltración	0.005 – 0.002	10.0 – 50.0
Ósmosis inversa	< 0.002	10.0 – 100.0

Fuente: (Laverde-Acurio et al., 2010; Sotto-Díaz, 2008)

2.4.3. Evaporación osmótica

En la industria alimentaria, las separaciones por membranas se han constituido en metodologías claves para la concentración, fraccionamiento y purificación de sustancias. La evaporación osmótica es un proceso atérmico de concentración con el que se logra concentrar soluciones diluidas (jugos) a temperatura ambiente y presión atmosférica (Kumar et al., 2020), conservando los parámetros de calidad (color, sabor, aroma y nutrientes).

La concentración por evaporación osmótica se basa en la diferencia de presiones de vapor entre la solución diluida (jugo) y un agente osmótico de baja actividad de agua (salmuera). En la Figura 6 se muestra el esquema de un sistema de evaporación osmótica de laboratorio, que incluye sistemas de bombeo con medidores de presión, tanques con recirculación y la membrana hidrofóbica (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013; Dova et al., 2007; Vaillant et al., 2001). La membrana, que separa la solución diluida y el agente osmótico,

está fabricada de polímeros hidrofóbicos como polipropileno, fluoruro de polivinilideno o politetrafluoroetileno. Como agente osmótico se utilizan soluciones salinas o salmueras con baja actividad de agua. Las sales más utilizadas son el cloruro de calcio (CaCl_2), cloruro de litio ($\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$) y cloruro de magnesio (MgCl_2).

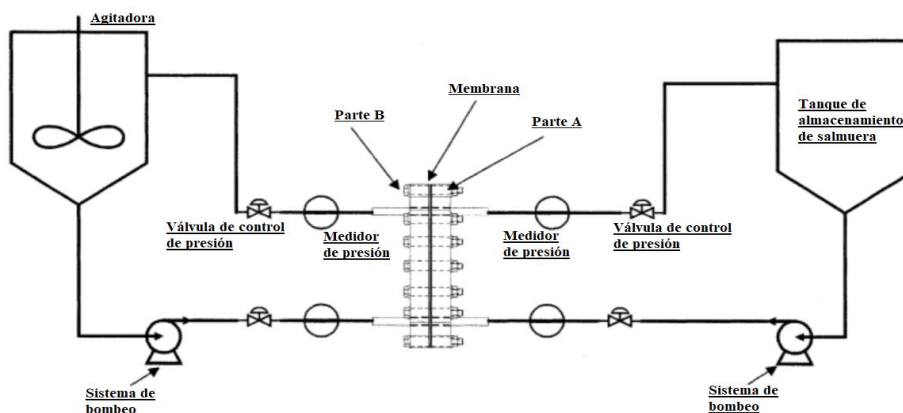


Figura 6. Esquema de un sistema de evaporación osmótica

Adaptado de: Petrotos et al. (2000).

La Figura 7 muestra un esquema del principio de transferencia de masa durante el proceso, donde la membrana, de cualidad porosa e hidrofóbica separa ambas soluciones. La membrana no sufre alteraciones por los líquidos, lo que favorece la creación de una interfase vapor-líquido en los poros. La diferencia de actividad de agua entre la alimentación (C_a) y el agente osmótico (C_p) se traduce en una diferencia de presiones de vapor, que actúa como fuerza impulsora (Pulido-Díaz et al., 2016; Zambra et al., 2014).

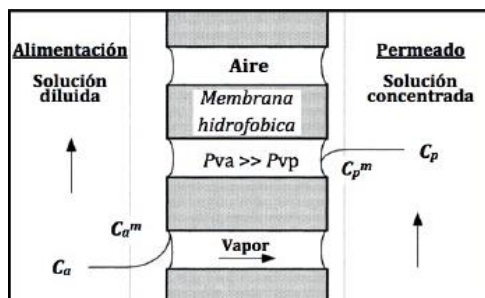


Figura 7. Principio del proceso de evaporación osmótica

Fuente: (Pulido-Díaz et al., 2016)

Durante el proceso ocurren los dos fenómenos de transferencia: masa y calor, aunque, el sistema se considera en equilibrio térmico debido a la armonía en las interfases vapor-líquido. Siempre que el sistema mantenga el gradiente de presión de vapor a través de la membrana, la transferencia de masa ocurrirá desde la región de alimentación a la membrana y finalmente al agente osmótico. El agua de la solución diluida en forma de vapor pasa a través de la membrana, dando como resultado la concentración de la alimentación y la dilución del agente osmótico (Rehman et al., 2019).

La Ecuación 1 es el modelo fundamental que describe el sistema mediante una relación entre el flux de vapor (N , kg/s - m²) y la fuerza impulsora por medio de una constante de proporcionalidad K (kg/m²-s-Pa) que es el coeficiente de transferencia de masa (Johnson et al., 2017; Vigié et al., 2013), donde las presiones de vapor del fluido de alimentación y permeado son P_{va} y P_{vp} respectivamente.

$$N = K (P_{va} - P_{vp}) \quad (1)$$

La presión de vapor en el fluido de alimentación y la salmuera dependen de la temperatura y la actividad adyacente a la superficie de la membrana; la fuerza impulsora (gradiente de presión parcial) puede formarse por diferencia de temperatura y concentración (Cassano et al., 2020). Las Ecuaciones 2 y 3 describen la presión de vapor en las bocas de los poros como el producto entre la presión de vapor saturado (P_{sat}) y la actividad de agua (a_w) en las soluciones.

$$P_{va} = P_{sat,1} a_{w,1} \quad (2)$$

$$P_{vp} = P_{sat,2} a_{w,2} \quad (3)$$

En el proceso de evaporación osmótica, la fuerza motriz ($P_{va} - P_{vp}$) para el transporte de agua se sustenta en la diferencia de actividad de agua, dado que si $P_{va} \gg P_{vp}$, entonces: $a_{w,1} \gg a_{w,2}$, para un proceso isotérmico (Gostoli, 1999; Ongaratto et al., 2018) .

3. ANTECEDENTES

En la Tabla 2, se presentan algunas investigaciones sobre la aplicación de procesos de clarificación y concentración de jugos de frutas.

Tabla 2. Procesos para la clarificación y concentración de jugos de fruta empleando evaporación osmótica.

Referencia	Objetivo	Condiciones de Proceso	Análisis	Resultados
Cavaliere de Alencar Guimarães et al. (2022)	Producción de poligalacturonasa (PGAj) de <i>Aspergillus japonicus</i> utilizando cáscara de maracuyá como fuente de carbono en SSF y su aplicación en la clarificación de diferentes tipos de zumos de frutas.	Jugo de 13 frutas obtenido por maceración con licuadora y tamizaje de la pulpa. La clarificación se realizó con la enzima (PGAj o Pectinex) en cada una de las muestras (2ml) con 3 U/mL en una proporción de 1:1 (v/v) por 4 h a 40 y 50 °C agitando a 140 rpm. Se inactivó la enzima llevando a ebullición por 5 min y se centrifugó a 16873 g por 20 min a 25°C.	Se registró la transmitancia a 650 nm contra un blanco de agua destilada utilizando un espectrofotómetro (UV-vis Genesys 10S). Posteriormente, se calculó el porcentaje de clarificación mediante una ecuación que relaciona los valores de transmitancia obtenidos.	La mejor clarificación se obtuvo en la pulpa de jugo Palmer con 65.5±0.1% a ambas temperaturas, resultado superior al obtenido con pectinasa comercial (Pectinex). Para guayaba y plátano 40.2±1.3% y 10.8±0.3% de clarificación, respectivamente. La clarificación fue deficiente en jugo de manzana (9,4±0,7%), acerola (2,4±0,1%) y papaya (1,7±0,4%), mientras que para los jugos de guavira, naranja, melón, ponkan, uva isis y uva victoria la clarificación fue indetectable.
Liguori et al. (2021)	Obtener concentrados de vegetales mediante evaporación	Jugo de apio sometido a centrifugación y filtración. Agente osmótico: Salmuera de extracción con concentración del 60% (p/v) de cloruro de calcio dihidratado.	Medición de sólidos solubles totales (SST) y color (L*a*b*) y su diferencia a 80, 120, 160 y 200 min, contenido de fenoles totales (por el método de Folin-Ciocalteau en g GAE/l) y la actividad de	Concentración del jugo de apio desde 3.5 hasta 16.1, 12.8 y 10.2 °Brix, para flujo de jugo igual al de salmuera, flujo de salmuera igual al doble de jugo y flujo de

	osmótica con alta retención de compuestos fenólicos y actividad antioxidante.	Proceso de evaporación osmótica: Se usó un módulo de membrana (1x5,5 Liqui-Cel): membrana de polipropileno, 1800 cm² área superficial, 42 µm de espesor y 14 cm de longitud, 40% de porosidad, 0,03 µm de diámetro de poro de membrana. Consta de 2300 fibras con dimensiones: 11,5 cm de longitud, 220 µm de diámetro interior y 300 µm de diámetro exterior.	eliminación de radicales DPPH expresada como porcentaje de inhibición de DPPH.	jugo igual al doble de salmuera, respectivamente.
Kumar et al. (2020)	Evaluar el potencial uso de evaporación osmótica en jugo de mandarina Nagpur (<i>Citrus reticulata</i> Blanco) y su impacto en el contenido de vitamina C y actividad antioxidante.	Jugo de mandarina sometido a centrifugación, ultrafiltración y ósmosis inversa. Agente osmótico: Solución de extracción con concentración de 55–60 % p/p de cloruro de calcio (CaCl₂). Proceso de evaporación osmótica: Se utilizó el retenido de la ósmosis inversa para el proceso de EO. La temperatura de la solución de alimentación y el agente osmótico constante (25,4 °C). Contactador de membrana Membrana-Charlotte Liqui-Cell (Liqui-Cel (X-50) (2.5×800): Usa superficie (1,4 m²), material de relleno de fibra polietileno, rango de temperatura (1–40-C) y máx. presión diferencial transmembrana (8,4 kg/cm²).	El jugo clarificado por UF se llevó de 18.9 a 60.4 °Brix mediante EO, durante un tiempo de 960 min, la cantidad de jugo se redujo de 4200 a 1510 g por efecto de la eliminación de agua. Se identificaron 4 etapas en el comportamiento del flujo de evaporación (kg/ m²h) en el proceso de EO, del proceso donde éste incrementa y disminuye en el tiempo con relación a la concentración del jugo y la solución del agente osmótico. El contenido de ácido ascórbico con los procesos de membrana fue para OI de 15.9, UF de 15.7 y EO de 15.5 mg/100 mL, lo que demostró una alta retención de vitamina C mediante el uso de tecnologías de membrana. Además, la actividad antioxidante obtenida mediante un ensayo ABTS varió entre 5.76 y 9.69 mmol L⁻¹Trolox	Se obtuvieron 182,2 mg GAE/l en el jugo final con respecto 141,1 mg GAE/l iniciales, al igual que un aumento en la actividad antioxidante. Se demostró que la evaporación osmótica es una alternativa para la obtención de un concentrado de mandarina Nagpur (<i>C. reticulata</i> Blanco) de alta calidad. Mediante el uso de tecnología de membrana se llevó el jugo desde 9 hasta 60° Brix posterior al proceso de EO. La disminución del flujo de evaporación depende del agente osmótico cuando el contenido de SST es bajo, mientras que a partir de 35 °Brix depende de la concentración del jugo.

Onsekizoglu-Bagci et al. (2020)	Aplicar un modelo difusional de transferencia de masa en concentración de jugo de manzana por evaporación osmótica en un módulo HFMC.	Jugo de manzana clarificado mediante filtración Agente osmótico: Solución de cloruro de calcio (CaCl_2). Proceso de evaporación osmótica: Bomba peristáltica: a escala de laboratorio (modelo BT600LC/YZ1515X, CR Pump, China) Módulo contactor de membrana de fibra hueca porosa hidrofóbica: Liqui-Cel™ mini módulo (modelo X-50) de polipropileno HFMC.	Se elaboró un modelo matemático de transferencia de masa para la concentración de jugos de frutas en MATLAB, se analizó el efecto de la EO en el jugo considerando la viscosidad como variable dependiente de la concentración de jugo y el tamaño de poro, esto se comparó con los valores experimentales. Se analizó el efecto del diámetro (0.1 a 0.6 μm) de la membrana y la diferencia de actividad del agua, número de Reynolds, la solución de depuración, concentración inicial del jugo en flujo de vapor de agua transmembrana (constante igual a 0.5) y de las condiciones de operación en el coeficiente de transferencia de masa (MTC)	Se encontró que el flujo de vapor de agua y el coeficiente de transferencia de masa general aumentaron con un aumento en las velocidades de flujo de la solución de extracción y alimentación debido a la disminución de la resistencia hidrodinámica de la capa límite, se redujo la actividad de agua del jugo, el flujo de vapor de agua y el coeficiente de transferencia de masa general aumentaron con el aumento de la temperatura global de las soluciones debido a la mayor presión de vapor de agua y la reducción de la viscosidad.
Rehman et al. (2019)	Evaluar el efecto del ensuciamiento sobre el rendimiento de membranas de configuración hueca de polipropileno	Jugo de Granada cruda - entera: Se realizó en un exprimidor Panasonic - M176P. Clarificación del jugo mediante filtración, en un filtro hilado de polipropileno. Una vez es clarificado el jugo, se almacena a 5°C. Agente osmótico: Solución de cloruro de calcio (CaCl_2) 6M. Proceso de evaporación osmótica: Placas calefactoras (modelo MS300, Bante Instruments, China): la temperatura de la solución de alimentación y el agente osmótico es constante. Bombas peristálticas (BT600LC / YZ1515X, CR Pump, China): Bombeo similar para	Medición de la actividad de agua del jugo de uva roja y del agente osmótico, mediante un higrómetro NOVASINA IC-500 AW-LAB Hygrometer (Switzerland). Cantidad de sólidos solubles iniciales y finales, cuantificados mediante un refractómetro (ZUZI WAYAS-15). Contenido fenólico total determinado por el método Folin-Ciocalteu 's, en equivalente de ácido gálico. Capacidad antioxidante medida por actividad antioxidante equivalente de Trolox.	El pH del alimento crudo y concentrado se mantuvo constante, debido a los efectos de amortiguamiento presentes en los jugos de fruta. El incremento de los azúcares totales (glucosa, sacarosa y fructosa) aumentaron en el concentrado debido a la eliminación parcial del agua, al igual que la acidez total (ácido gálico, elágico, clorogénico, cafeico, cítrico y oxálico). El ensuciamiento de la membrana es perjudicial, puesto

		ambas soluciones. Mini-Módulo de fibra hueca: Modelo Cellgard Liquicel™, con membrana hecha de polipropileno, con alrededor de 7400 fibras y un área de contacto de 0,58 m ² .		que representa una resistencia extra a la transferencia de masa a través de ésta, debido al bloqueo por incrustamiento del poro.
Domingues et al. (2014)	Estudiar los diferentes pretratamientos (centrifugación, licuefacción enzimática y clarificación por quitosano) para la microfiltración de jugo de maracuyá.	Jugo de maracuyá. Centrifugación por 5 min a dos fuerzas (6000 y 14000g). El tratamiento enzimático se realizó con el complejo Pectinex 3XL (Novozymes) con temperatura (44°C) y agitaciones constantes. Clarificación con quitosano con agitación suave. El módulo de microfiltración es de fibra hueca con tamaño de poro de 0.4 micrómetros.	Durante las diferentes etapas se midió la turbidez, color, sólidos solubles y viscosidad. Para describir el ensuciamiento del módulo de microfiltración se realizó un modelo matemático de acuerdo con el método Levenberg-Marquardt.	Los sólidos solubles totales no se vieron afectados en gran medida por los tratamientos empleados. La enzimación redujo la viscosidad. Mayores valores de velocidad en la centrifugación introducen menores valores de turbidez y color. El quitosano permite reducir la turbidez hasta en un 99%. Recomiendan usar centrifugación con quitosano para el procesamiento de jugos.
Zambra et al. (2014)	Concentrar jugo de arándano mediante evaporación osmótica e identificar las principales variables de operación y desarrollar un modelo de transferencia de masa para	Néctar de arándano (8,6 °Brix) Agente osmótico: Salmuera con concentraciones: 30, 40 y 50% p/v. Proceso de evaporación osmótica: Baño termostático: temperatura de la solución de alimentación y el agente osmótico constante (30 ó 40°C). Bombas peristálticas: Bombeo similar para ambas soluciones Mini-Módulo de fibra hueca: Modelo Cellgard Liquicel™, con membrana hecha de polipropileno, con alrededor de 7400 fibras y un área de contacto de 0,58 m ² .	Cuantificación de los polifenoles usando el método modificado de Folin–Ciocalteu. Determinación de antocianina monomérica por la metodología de diferencias de pH. Modelado teórico y experimental del fenómeno de transferencia de masa, interpretado como la transferencia secuencial desde la capa límite de la solución a tratar, el poro membranal lleno de gas y capa límite del agente osmótico.	Se demostró que la evaporación osmótica no afecta el contenido de compuestos fenólicos, específicamente antocianinas. La viscosidad del jugo aumenta conforme se concentra, hecho que disminuye la concordancia del fenómeno de transferencia durante el proceso.

sustentar las
cinéticas de
concentración del
jugo.

Forero et al. (2013)	Optimizar el proceso de evaporación osmótica en jugo de maracuyá (<i>Passiflora edulis</i>)	Jugo de maracuyá con 15,29 °Brix, posteriormente clarificado y ultrafiltrado. Agente osmótico: Salmuera con concentración de 45% p/v de cloruro de calcio (CaCl_2). Proceso de evaporación osmótica: Baño termostático: temperatura de la solución de alimentación y el agente osmótico constante (28°C). Bombas peristálticas: Bombeo de caudal de salmuera (20-40 ml/min) y caudal jugo (10-30 ml/min) Módulo MD020CP2N®: Usa una membrana hidrofóbica de polipropileno de 0.104 m², que posee 40 capilares.	Caracterización del maracuyá por sólidos solubles (SS), pH, viscosidad, sólidos totales (ST) y turbiedad. El prefiltrado fue útil para evitar la colmatación de las membranas de ultrafiltración. El jugo ultrafiltrado disminuye sus SS debido a falta de reducción de hemicelulosa, se redujo turbiedad, viscosidad y pH. El flujo de salmuera, flujo de jugo y temperatura son significativos en el flujo de evaporación y SS. Mediante el modelo de superficies de respuesta se optimizaron las variables de proceso.	Las variables de proceso óptimas fueron temperatura 31 °C, caudal salmuera 242 (ml/min), caudal jugo 146 (ml/min), con las que se alcanzó una concentración final de 52.25 ± 0.36 °Brix y un flux de 0.52 (kg/m² h).
Domingues et al. (2012)	Evaluar la aplicación de quitosano como auxiliar en el proceso de clarificación en el procesamiento de maracuyá.	Pulpa de maracuyá amarilla previamente centrifugada a velocidades entre 4000 y 10000 rpm durante 5 min. Se clarificó con quitosano al dejar en sedimentación por 2 h.	Se analizó la turbidez, viscosidad, color y sólidos solubles totales. Para obtener un buen resultado en la clarificación es necesaria la centrifugación suave, de esta forma se promueve la coagulación/floculación del quitosano.	Durante la floculación se formaron copos, a medida que transcurría el tiempo y paraba la agitación los copos decantaban. Se encontró que el pH y la concentración de floculante se relacionan negativamente con la turbidez, color y viscosidad. La centrifugación disminuye significativamente la turbidez del jugo. Y el proceso de clarificación por quitosano es una alternativa al procesamiento de

				frutas, debido a su abundancia en la naturaleza.
Valdés et al. (2009)	Concentrar jugo de noni mediante evaporación osmótica a condiciones isotérmicas, identificar el cambio de los compuestos fenólicos.	Jugo de noni Tahitiano y salmuera constituida de cloruro de calcio con concentración: 2, 4 y 6 mol kg ⁻¹ Proceso de evaporación osmótica: Baño termostático: temperatura de la solución de alimentación y el agente osmótico constante (30°C). Bombas peristálticas: Bombeo de caudal de salmuera (0,1-0,5 L/min) y caudal jugo (0,1-0,5 L/min) Módulo de fibra hueca Celgard Liquicel 1 x 5,5 (2300 fibras, 0,18 m ² de área de contacto). Mini módulo Celgard Liquicel 1,7 x 5,5 (7400 fibras, 0,58 m ² de área de contacto).	Contenido fenólico total determinado por el método Folin–Ciocâlțeu modificado.	El efecto de mayor relevancia sobre el rendimiento del proceso es la concentración de la salmuera. El procesamiento preservó la calidad del jugo de noni, obteniendo una concentración sin pérdida de compuestos fenólicos.
Cassano & Drioli (2007)	Evaluar el potencial del proceso de evaporación osmótica en la concentración de jugo de kiwi clarificado a escala de laboratorio con base en el contenido de ácido ascórbico y actividad antioxidante total.	Selección y molienda de los kiwis, posterior tratamiento enzimático mediante una pectinasa de <i>Aspergillus</i> . Clarificado: mediante una unidad piloto de laboratorio de ultrafiltración (Verind SpA, Milán, Italia) equipada con un módulo de membrana tubular (Koch Series-CorTMHFM 251, fluoruro de polivinilideno, 15 kDa, 0,23 m ²) a temperatura constante mediante intercambiadores de calor de tubo y coraza, reciclando el material retenido operando a 700 L/h y 25°C. Evaporación osmótica: se realizó mediante un equipo Liqui-Cell-Extra-Flujo 2.5·Contactor de membrana de 8 pul.	Se midió el contenido de ácido ascórbico mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), la actividad antioxidante total fue determinada mediante e decoloración por radicales libres de - azinobis - (3 - etilbenzotiazolina - 6 - sulfónico) (ABTS). A través del proceso de evaporación osmótica, se concentró el jugo hasta 66,6 °Brix. A una concentración baja de SS la disminución del flujo de evaporación se atribuye a la solución de extracción mientras que por encima de 35°Brix se atribuye a la viscosidad del jugo, en consecuencia, a la concentración.	Se demostró que el proceso de evaporación osmótica no influye en el contenido de ácido ascórbico y la actividad antioxidante total independientemente del grado de concentración alcanzado, mientras que el concentrado por evaporación tuvo pérdidas del 87% y el 50% respectivamente.

4. PROBLEMÁTICA

El proceso de obtención de concentrados de jugos necesita de una adecuada selección en la tecnología de concentración y en las condiciones óptimas de proceso, las cuales influyen en el deterioro de las propiedades nutricionales (vitaminas y fitoquímicos) y sensoriales (color, sabor, aroma) del producto final. El uso de métodos que emplean altas temperaturas resulta más cómodo para escalamiento a nivel industrial debido a su relativo bajo costo (Bonilla, 2005). Sin embargo, este método presenta problemas de pérdida de calidad nutricional y deterioro en las propiedades organolépticas del producto por efecto de la temperatura (Ávila-De Hernández & Bullón-Torrealba, 2013). Además de esto, los productos obtenidos por este método requieren el uso de aditivos (Juárez, 2012), lo que genera un impacto negativo en la percepción del consumidor, cuya tendencia actual se ha enfocado en el consumo de productos de origen natural (Margarita & Fuentes, 2012). Siendo así, el proceso de evaporación osmótica se constituye como una alternativa a la evaporación tradicional.

De acuerdo con lo anterior, se formula la siguiente pregunta de investigación:

Pregunta de investigación:

¿Cuáles son las mejores condiciones en el proceso para concentrar jugo de maracuyá mediante evaporación osmótica?

5. JUSTIFICACIÓN

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2021), en Colombia hay sembradas 15 mil hectáreas de maracuyá y una producción de 600 mil toneladas. El cultivo de maracuyá se encuentra en crecimiento, según el Ministerio de Agricultura, en el año 2021 se produjo en 24 departamentos y 422 municipios (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). Es una de las frutas más apetecidas por su contenido de vitaminas y minerales, y su característico sabor entre dulce y ácido, además de su apariencia llamativa por los tonos intensos de amarillo (Aguila-Tello, 2022). La evaporación convencional genera pérdidas de compuestos termolábiles y termosensibles responsables de las propiedades sensoriales y nutricionales de los productos alimenticios (Mendoza-Corvis et al., 2015). La concentración se realiza con el fin de aumentar el valor comercial ya que al reducir el peso se facilita la conservación y diversifica el uso del producto. Por lo tanto,

esta propuesta plantea explorar el proceso de evaporación osmótica, como alternativa a los procesos térmicos de concentración.

La concentración por evaporación osmótica es una técnica de concentración que utiliza como principio la diferencia de presiones para la concentración de jugos y otros alimentos líquidos. A través de una membrana microscópica e hidrófoba se genera un gradiente de presión de vapor mediante una solución osmótica de sal ubicada a lado del permeado del producto, este proceso se realiza de forma isotérmica lo que permite una alta retención de calidad en cuanto a las características fisicoquímicas del alimento (Tavares et al., 2022). En algunos trabajos se ha demostrado que durante los pretratamientos el perfil sensorial de los jugos se conserva y durante la concentración ocurre una alta retención de calidad de las propiedades nutricionales, concibiendo al proceso de evaporación osmótica como una alternativa a la concentración por evaporación.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

- Diseñar un proceso concentración de jugo de maracuyá empleando la tecnología de evaporación osmótica.

6.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones de hidrólisis enzimática para el jugo de maracuyá en las cuales se obtengan propiedades físicas adecuadas para su procesamiento.
- Evaluar las condiciones de clarificación del jugo de maracuyá previo al proceso de evaporación osmótica.
- Concentrar jugo de maracuyá empleando el sistema de evaporación osmótica.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Material vegetal

Se recibieron frutos de maracuyá provenientes de un cultivo ubicado en el departamento del Cauca perteneciente a la Asociación Nacional de Usuarios Campesinos de Colombia (ANUC-Cauca), los cuales fueron seleccionados, separando los frutos con deterioro o señales de ataque de hongos o insectos. Los frutos se lavaron y desinfectaron en una solución de hipoclorito al 1% (v/v) durante 1 min, enjuagando con agua filtrada y secando con papel absorbente.

Posteriormente se tomaron las dimensiones (longitud y diámetro) de 30 frutas con un pie de rey digital y se pesó el fruto, la pulpa y la cáscara para determinar los rendimientos. El jugo se obtuvo retirando la cáscara del fruto y extrayendo la pulpa manualmente. Con la mitad del lote se obtuvo el jugo con una licuadora y el resto se despulpó en una despulpadora (COMEK modelo 200KC/HR, Colombia) con criba de 4 mm, para separar las semillas. El jugo se filtró por un tamiz de 1 mm de para retirar fragmentos de semillas. Finalmente se envasó y almacenó a -10°C hasta su uso.

7.2. Tratamiento enzimático

Con el fin de reducir la colmatación en las membranas, se utilizaron enzimas para descomponer o separar las pectinas y polisacáridos presentes en el material vegetal (Cely et al., 2020). Para la preclasificación del jugo obtenido por licuado y despulpado se empleó Depol-40L y Natuzym-SF, ambas pertenecientes a la familia de enzimas hidrolasas.

La enzima Depol-40L es una carbohidrasa de amplio espectro que contiene celulasa y endogalacturonasas que degradan tejidos vegetales, contiene además de las actividades macerantes, una amplia gama de exoglicosidasas (Biocatalysts, 2015). Por otro lado, la enzima Natuzym-SF es un complejo de pectinasa, contiene una amplia gama de actividades secundarias como pectinliasa, poligalacturonasa y hemicelulasa que permiten la degradación de los compuestos de la pared celular del fruto (Weiss Bio Tech, 2022). Estas enzimas fueron seleccionadas porque aumentan el rendimiento del jugo, mejoran la clarificación y reducen los riesgos por colmatación en las membranas, considerando que degradan cadenas de los principales polisacáridos presentes en el jugo de maracuyá como la pectina, la celulosa y la hemicelulosa (Peñafiel-Arcos, 2015). El tiempo de acción de las enzimas se seleccionó teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de cada una de ellas (Tabla 3).

Tabla 3. Especificaciones técnicas para la aplicación de las enzimas

Tipo de enzima	Fabricante	Tiempo de aplicación (h)	pH	Temperatura (°C)	Cantidad
Depol-40L	BioCatalysts Inc.	3.0	4.0 - 6.0	40 – 60	2% Materia seca de la muestra
Natuzym-SF	WeissBioTech GmbH	1.5	N/A	50 – 55	100 – 150 g/ton

7.3. Centrifugación

Después del tratamiento enzimático, el jugo se clarificó por centrifugación (Indulab, Special-004-E, Colombia) con velocidad de 5000 rpm en viales con 2.5 cm de diámetro. Se utilizó la máxima velocidad permitida por el equipo con el fin de obtener mayor separación de sólidos insolubles (Kumar et al., 2020). Posterior a la centrifugación, se separaron los restos del precipitado por filtración asistida con una bomba de vacío (Rocker 600, Boeco, Alemania) y con un filtro de papel (Whatmman 2°, Reino Unido) con tamaño de poro de 8 μm . Se contempló el uso de floclulantes como el quitosano para mejorar los resultados obtenidos por centrifugación sin cambiar las propiedades sensoriales del producto y así mismo, sustituir la ultrafiltración debido a la dificultad que presenta la tecnología de membranas para escalarse. Sin embargo, se decidió no utilizarlos porque esto aumentaría los tiempos y los costos de operación.

7.4. Evaporación osmótica

Se utilizó un módulo de deshidratación osmótica Liqui-Cel EXF-4x13 (3M, Estados Unidos) provisto de una membrana hidrofóbica de polipropileno de 8.2 m² con tamaño promedio del poro de 0.1 μm . Las condiciones máximas en las que el módulo opera son: 40°C y 5.2 bar, el interior (capilares) y exterior de la membrana cuenta con volúmenes de 0.6 y 12 L, respectivamente. La Figura 8 presenta la geometría del módulo. El sistema se ensambló con mangueras de 1/2 pul, utilizando baños termostáticos (Lauda, Estados Unidos) para el calentamiento y enfriamiento del jugo y salmuera, respectivamente. Para el control de caudales, se emplearon bombas peristálticas (530S, Watson Marlow, Reino Unido).

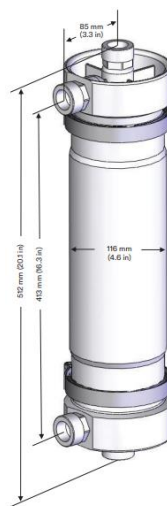


Figura 8. Geometría del módulo Liqui-Cel EXF-4x13

Tomado de: (3M, 2021)

En el proceso de concentración por EO los poros de la membrana se llenan con la fase gaseosa de la solución a concentrar (jugo). La fuerza impulsora del proceso se debe a la diferencia de presión de vapor parcial entre el jugo y una salmuera altamente concentrada (cloruro de calcio, 50%) que fluye al otro lado de la membrana, esta fuerza impulsora depende de la temperatura y concentración de las soluciones. Se realizó una única corrida de 3 h dividida en 2 etapas de 90 min para la verificación del sistema, al finalizar la primera etapa la solución de salmuera diluida es nuevamente saturada, el producto concentrado es reconstituido con jugo sin concentrar y la membrana es lavada con agua destilada, hidróxido de sodio (0.1 N) y ácido cítrico (4%), la separación del proceso en etapas promueve la eficiencia durante la EO, ya que al depurar el interior durante la limpieza se disminuye el riesgo de colmatación y, la restauración en la concentración del agente osmótico disminuye la actividad de agua, aumentando la eficiencia en etapas siguientes (Hongvaleerat et al., 2008). Al finalizar se determinaron las características fisicoquímicas del concentrado obtenido. En la Tabla 4 se presentan las condiciones utilizadas en el proceso de EO.

Tabla 4. Condiciones de proceso de EO

	Jugo de maracuyá	Cloruro de calcio (50%)
Temperatura (°C)	35	20
Caudal (ml/min)	800	1100

En la Figura 9 se presenta el diagrama del proceso de concentración de maracuyá por evaporación osmótica.

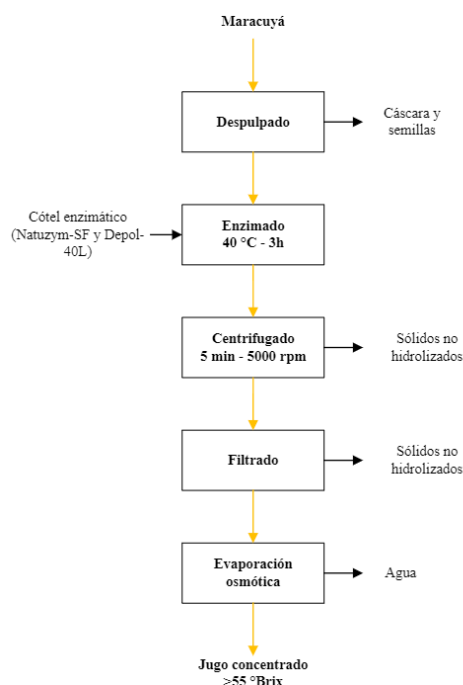


Figura 9. Operaciones unitarias para la obtención de concentrado de maracuyá

7.5. Análisis fisicoquímicos

En todas las etapas se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del jugo. La determinación de sólidos solubles (°Brix) se realizó con un refractómetro (PAL BX-RI, Atago, Japón) previamente calibrado con agua destilada, para el contenido de sólidos totales se usó la norma AOAC 930.15; el pH se midió con un potenciómetro (HI2020-01, Hanna Instruments, Italia) estandarizado con soluciones buffer de 4 y 7 pH, la acidez titulable en equivalentes de ácido cítrico se determinó siguiendo la norma NTC 4103 (1997), la viscosidad a 25 ± 0.5 °C se midió empleando un viscosímetro (DV-III Ultra, Brookfield, Estados Unidos) con aguja N°00 con soporte LV (enchaquetado), la turbidez se determinó con un turbidímetro estandarizado con soluciones de 0.5, 75, 100 y 700 NTU (2100AN, HACH, Estados Unidos) y el tamaño de partícula promedio se evaluó empleando un Zetasizer calibrado con agua destilada (Nano S90, Micro TAC, Japón).

8. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

8.1. Tratamiento enzimático

Se empleó un diseño bifactorial para identificar la influencia de los factores (tiempo y tipo de enzima) sobre las variables fisicoquímicas del jugo obtenido por trituración que generalmente presentan mayor alteración en las matrices de origen vegetal durante procesos de digestión química.

La Tabla 5 presenta las variables de proceso del diseño de experimental factorial para la determinación del efecto de las enzimas por separado.

Tabla 5. Diseño experimental para la determinación del efecto de las enzimas por separado

Variables de proceso	Nivel de factor	Variables de respuesta
Tiempo (hora)	1.5, 3	Sólidos solubles (°Brix)
Enzima	Natuzym SF, Depol-40L	Densidad (g/cm ³)
		Viscosidad (cP)

Por otra parte, se seleccionó un diseño de experimentos de superficie de respuesta para seleccionar el mejor tratamiento al emplear ambas enzimas simultáneamente. Este diseño es una alternativa para mitigar los inconvenientes que otros diseños presentan en cuanto a la cantidad de tratamientos, donde el número de factores y niveles crecen considerablemente, además, permite inspeccionar las respuestas que están en la región de interés y de esta forma optimizarlas (Jiménez y Palacios, 2021; Penadés et al., 2019). En la Tabla 6 se presentan los elementos empleados para crear el plan de experimentos (Tabla 7) mediante el uso de software Minitab 19®, los niveles fueron seleccionados con base en las especificaciones técnicas de las enzimas. Como variables de respuesta se escogieron los sólidos solubles y la viscosidad, debido a que éstas muestran la acción enzimática en la hidrólisis de los principales polisacáridos presentes en el jugo de maracuyá que generan el aumento de sólidos solubles gracias a la liberación de monosacáridos, disacáridos o cadenas cortas solubles, lo que a la par se ve reflejado en la reducción de viscosidad. El criterio de selección de la condición óptima fue el tratamiento que diera como resultado el mayor valor de sólidos solubles y menor valor de viscosidad, con el fin de mejorar el rendimiento en las etapas posteriores obteniendo un jugo con mayor contenido de sólidos solubles, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el rendimiento del jugo a través de la disminución de sólidos insolubles, por otro lado, la disminución en viscosidad es un parámetro importante en el desempeño de los procesos por membrana, ya que en cuanto menor sea su magnitud mayor será el rendimiento de la operación.

Tabla 6. Parámetros empleados para la construcción del diseño experimental

Factor	Tipo	Unidad	Mínimo	Máximo
Natuzym SF	Numérico	ml/50g	0.0063	0.0075
Depol-40L	Numérico	ml/50g	0.0697	0.1045

Tabla 7. Plan de experimentos

Ensayo	Natuzym (ml/50g)	Depol-40L (ml/50g)
1	0.0050	0.1394
2	0.0075	0.1394
3	0.0063	0.1046
4	0.0063	0.1046
5	0.0063	0.1046
6	0.0045	0.1046
7	0.0080	0.1046
8	0.0063	0.1046
9	0.0075	0.0697
10	0.0063	0.0553
11	0.0063	0.1046
12	0.0050	0.0697
13	0.0063	0.1538

Para escalar en volumen las pruebas de enzimación, se optó por un diseño experimental completamente aleatorizado. La Tabla 8 muestra la variable de proceso para la determinación de la linealidad durante el proceso de enzimación y sus respectivas variables de respuesta, relevantes en el proceso de concentración por membranas.

Tabla 8. Diseño experimental para la determinación de la linealidad del efecto de las enzimas

Variable de proceso	Niveles	Variables de respuesta
Volumen del jugo (ml)	50, 500, 1000	Sólidos solubles (°Brix) Viscosidad (cP)

8.2. Centrifugación

Se seleccionó un diseño experimental totalmente al azar para determinar la influencia del tiempo de centrifugación (5, 10, 15 y 20 min) a velocidad constante (5000 rpm) sobre la remoción de sólidos suspendidos en el jugo, con base en parámetros para esta operación de clarificación encontrados en la literatura (Domingues et al., 2014; Domingues et al., 2012).

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Material vegetal

Los frutos de maracuyá (*Passiflora edulis*) presentaron una longitud y diámetro promedio de 9.16 ± 0.91 y 7.63 ± 0.72 cm, respectivamente, este tipo de geometría ovalada con largo

superior dificulta el manejo en empaques, por lo cual, se maneja a granel. En la Figura 10 se presenta el protocolo empleado durante la etapa de obtención del jugo. El peso total de la materia prima fue de 5.8 kg (Corriente 9), donde 1.9 kg corresponden a la pulpa con semilla (Corriente 11) y 3.9 kg al peso de la cáscara (Corriente 10). El rendimiento obtenido fue del 32.66% hasta la operación de despulpado manual. La FAO señala que el fruto puede alcanzar hasta un 40% de jugo del peso de la fruta, por lo que, se considera que se obtuvo un alto rendimiento de pulpa.

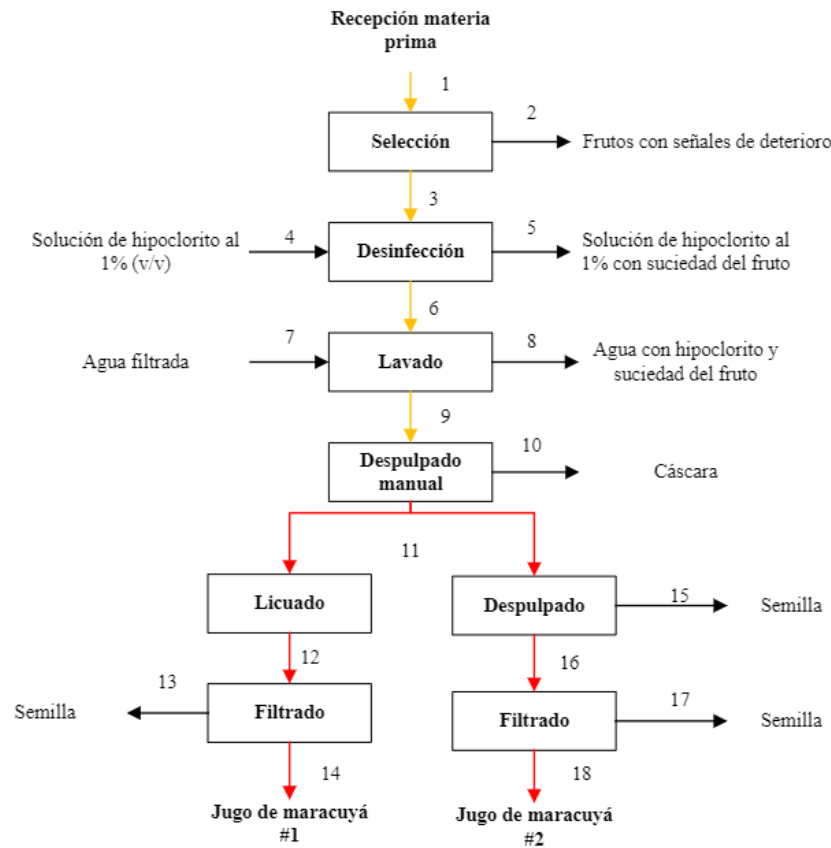


Figura 10. Diagrama de bloques de las operaciones para obtención de jugo

El rendimiento del jugo sin semilla varió según la forma de obtención. Empleando licuado, el rendimiento fue de 19.00%, este proceso generó dificultades durante el filtrado para la remoción de la semilla debido a la pronta colmatación de los filtros (malla de nylon, tamiz de acero inoxidable) causada por la fracturación de la semilla. Por otra parte, la obtención de jugo por máquina despulpadora aumentó el rendimiento a 24.17%, es decir, 0.24 kg de jugo sin semillas por cada kg de fruta. El aumento en el rendimiento se debe a la eliminación parcial de

semilla que retiene la criba con diámetro de 4 mm, que, a su vez, evitan el taponamiento de la malla durante el filtrado.

El jugo de maracuyá #1 (Figura 10) presentó un contenido de sólidos solubles de 12.50 ± 0.20 °Brix y pH de 3.02 ± 0.03 , valores que están de acuerdo con lo reportado por otros autores (Matute & Echavarría, 2018). Los valores de viscosidad (16.77 ± 0.15 cP) y turbiedad (>10000 NTU) se deben a la ruptura de la semilla, con la consecuente liberación de aceites, proteínas, fibras y moléculas que cambian las propiedades del jugo debido al incremento de partículas en suspensión y sólidos insolubles (Pantoja-Chamorro et al., 2017). Además, la trituration de la semilla dificulta su remoción, ya que se necesita de múltiples etapas de filtrado, lo que resulta en pérdida de jugo y aumento en el tiempo de proceso. El jugo #2 (Figura 10) obtenido en despulpadora presentó valores de viscosidad y turbiedad menores, 9.40 ± 0.25 cP y 7309 ± 53.86 NTU, respectivamente. A pesar de no ocurrir la destrucción de la semilla, se desintegran los arilos del fruto, los cuales se componen de polisacáridos insolubles como pectinas, celulosa, hemicelulosa, lignina y almidón, principales responsables del comportamiento fisicoquímico del jugo (Crisóstomo et al., 2015).

9.2. Tratamiento enzimático

9.2.1. Efecto individual

Los resultados de sólidos solubles, viscosidad y densidad se muestran en la Tabla 9. Todos los tratamientos aumentaron los sólidos solubles en al menos 1 °Brix (12.50 ± 0.20 °Brix, iniciales) y disminuyeron la viscosidad del jugo. El análisis de varianza para las variables de respuesta (Tabla 10) muestra que fueron afectadas significativamente por el tiempo (p-valor < 0.05), encontrándose como tratamientos más efectivos aquellos que se realizaron en 3 h.

Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del efecto de las enzimas por separado

Enzima	Tiempo (h)	Sólidos solubles (°Brix)	Viscosidad (cP)	Densidad (g/cm ³)
Natzym-SF	1.5	13.23 ± 0.15	15.40 ± 0.73	1.05 ± 0.01
	3	13.60 ± 0.30	8.57 ± 0.47	1.05 ± 0.00
Depol-40L	1.5	13.17 ± 0.16	8.23 ± 0.33	1.02 ± 0.01
	3	13.30 ± 0.10	6.56 ± 0.24	1.05 ± 0.00

De acuerdo con la Tabla 9, con un tratamiento de 3 h, se obtuvo una viscosidad de 8.57 ± 0.47 cP y sólidos solubles de 13.6 ± 0.30 °Brix con Natuzym SF, mientras que, con Depol-40L la viscosidad y sólidos solubles obtenidos fueron menores, 6.56 ± 0.24 cP y 13.3 ± 0.1 °Brix, respectivamente. Esto se debe a la diferencia de ambos cocteles enzimáticos.

Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de las enzimas por separado

	Factor	Valor F	Valor P
Sólidos solubles (°Brix)	Enzima – A	2.95	0.124
	Tiempo - B	5.49	0.047
	AB	1.20	0.306
Viscosidad (cP)	Enzima – A	554.50	0.001
	Tiempo – B	451.50	0.001
	AB	125.25	0.000

El cóctel Natuzym-SF contiene tres enzimas pécticas y hemicelulasa; dentro de las primeras se encuentran las poligalacturonasas divididas en endo-galacturonasas y exo-galacturonasas que hidrolizan los enlaces glucosídicos de los ácidos galacturónicos en el centro y los extremos de las pectinas (Menéndez et al., 2006) y las pectinliasas, que degradan el enlace glucosídico presente en el ácido galacturónico (De Los Ángeles et al., 2015); la hemicelulasa hidroliza los enlaces β -1,4 del heteropolisacárido, liberando cadenas de pentosas (pentosanós) y monosacáridos solubles, como la xilosa y arabinosa (Moctezuma, 2017), estas reacciones son mostradas en el Apéndice 1.

Por otro lado, el coctel Depol-40L contiene celulasas y endopoligalacturonasas que actúan sobre las cadenas de polisacáridos presentes en el jugo de maracuyá. Las celulasas degradan los enlaces β -1,4 de los glucanos, generando disgregación estructural de la glucosa reduciéndola en celobiosas y finalmente en moléculas de D-glucosa (Ovando-Chacón & Waliszewski, 2005). La degradación aumenta los sólidos solubles presentes en el jugo adicional a la acción de hidrólisis de pectinas por endopoligalacturonasas que rompen sus enlaces α -1,4 glicosídicos (García et al., 2002). Cabe destacar que, las poligalacturonasas, petinliasas, celulasas y hemicelulasas aumentan la solubilidad de los azúcares al descomponer los polisacáridos presentes en el jugo, y de esta forma incrementan los sólidos solubles, pero, sólo las tres primeras generan reducción de viscosidad, mientras que las hemicelulasas promueven la liberación de pentosanós que

pueden absorber hasta siete veces su peso en agua, lo que genera un incremento en la viscosidad del jugo (Toaquiza-Toapanta, 2011).

El aumento de sólidos solubles ocurre por la hidrólisis de los polisacáridos insolubles, específicamente la celulosa en sus zonas cristalinas y amorfas; la primera tiene la capacidad de retener agua, pero al encontrarse con la zona amorfa pierde dicha característica, a pesar de tener grupos hidroxilos libres lo que haría de éste un polisacárido soluble. Estos grupos interactúan entre sí mediante puentes de hidrógeno, lo que evita su hidratación por la cercanía entre cadenas, resultando en un comportamiento de sustancia insoluble (Gañán et al., 2017). Cuando se hidrolizan los enlaces glucosídicos β -1,4 entre las celobiosas se liberan cadenas más cortas y unidades de glucosa que pueden ser hidratadas, esto también ocurre con las zonas insolubles (alto peso molecular) de la hemicelulosa donde por acción enzimática se liberan pentosanos. Lo anterior se ve reflejado en el aumento de sólidos solubles registrado en el jugo de maracuyá después de los tratamientos enzimáticos aplicados.

La disminución de viscosidad se debe principalmente a la reducción del peso molecular (extensión) de los polisacáridos por acción enzimática, reduciendo la extensión de sus cadenas a estructuras más cortas o monosacáridos que en general tienen menor capacidad de ligar agua, a diferencia de los pentosanos que captan más agua tras dividirse de la hemicelulosa. Este efecto aumenta el rendimiento del jugo y disminuye el tiempo de filtrado (Cavalieri de Alencar Guimarães et al., 2022).

9.2.2. Efecto combinado de las enzimas

En la digestión enzimática, todos los niveles fueron efectivos para disminuir la viscosidad y aumentar los sólidos solubles respecto al jugo inicial (Tabla 11) con valores de 16.77 ± 0.15 cP y 12.50 ± 0.20 °Brix. Estos resultados se deben a la ruptura de los múltiples enlaces que están presentes en las cadenas largas que conforman a las moléculas celulosa y principalmente la pectina, la cual al fragmentarse se solubiliza y de esta forma disminuye la viscosidad y aumenta los sólidos solubles debido a la división del peso molecular de la cadena principal (Chirivi y Palencia, 2019; Ramírez, 2019). El análisis estadístico mostró que no hay diferencias significativas en los tratamientos, como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 11. Diseño experimental y respuestas generadas por la enzimación del jugo de maracuyá

Ensayo	Natuzym-SF (ml/50g)	Depol-40L (ml/50g)	Sólidos solubles (°Brix)	Viscosidad (cP)
1	0.0050	0.1394	13.23	8.900
2	0.0075	0.1394	13.60	10.80
3	0.0063	0.1046	14.17	10.20
4	0.0063	0.1046	14.07	9.940
5	0.0063	0.1046	13.23	10.90
6	0.0045	0.1046	13.47	7.970
7	0.0080	0.1046	13.80	10.20
8	0.0063	0.1046	13.20	9.980
9	0.0075	0.0697	13.23	10.50
10	0.0063	0.0553	14.03	10.80
11	0.0063	0.1046	13.60	9.610
12	0.0050	0.0697	13.43	10.10
13	0.0063	0.1538	13.33	9.610

Tabla 12. ANOVA para el efecto de las concentraciones de enzima sobre los sólidos solubles y viscosidad

Variable de respuesta	Factor	Valor P
Sólidos solubles	Modelo	0.538
	A – NatuzymSF	0.374
	B – Depol-40L	0.521
Viscosidad	Modelo	0.537
	A – NatuzymSF	0.370
	B – Depol-40L	0.528

Al efectuar el ANOVA, se encontró que las enzimas no tuvieron efecto significativo sobre las dos variables de respuesta, es decir, los resultados son estadísticamente iguales independientemente de la concentración de enzimas empleadas en los intervalos establecidos ($P\text{-valor} > 0.05$). Es probable que este comportamiento se deba al agotamiento del sustrato durante la catalización de las reacciones hidrolíticas, es decir, en un medio con exceso de concentración de enzimas y sustrato limitado, la actividad enzimática tenderá a disminuir, pues el centro activo del complejo enzimático permanecerá libre de reacción, producto de alcanzar el máximo de hidrólisis obtenible (Restrepo-Osorio, 2015). Sin embargo, es recomendable emplear la combinación de enzimas de tipo pectinasa y celulasa

debido a la composición de la matriz, ya que el jugo de maracuyá contiene pectina en los tejidos celulares primarios y celulosa en las cadenas largas de fibra, los cuales son los responsables del comportamiento fisicoquímico del jugo (Pardo et al., 2011).

En trabajos de evaporación osmótica se utilizan tecnologías de clarificación como pretratamiento, tales como centrifugación y microfiltración, con el fin de retirar los polisacáridos presentes en el jugo, los cuales se describen como la principal fuente de obstrucción debido su tamaño y peso molecular. Flores-Salazar (2017) reporta que el retenido del proceso de microfiltración de jugo de maracuyá contiene 34.6 % de pectina, 3.5% de celulosa y 1.5% de hemicelulosa. Lo anterior indica que para hidrolizar los polisacáridos del jugo y mejorar el rendimiento de las operaciones de clarificación y evaporación osmótica es necesario emplear un coctel de enzimas (pectinasas, celulasas y hemicelulasas). Este resultado concuerda con la investigación de hidrólisis enzimática de los sólidos insolubles del jugo de maracuyá realizada por Flórez-Pardo et al., (2012).

Como se mencionó en el apartado anterior, se obtuvo un buen resultado al implementar los cocteles por separado; Depol-40L (acción celulítica y pectolítica) y Natuzym-SF (acción pectolítica y hemicelulítica), pero, de acuerdo con la Tabla 11, se obtuvo mejor resultado en sólidos solubles y viscosidad al combinar los cocteles enzimáticos, lo que muestra una acción sinérgica. Ovando-Chacón & Waliszewski (2005) afirman que la combinación de enzimas con acción pectolíticas y celulíticas generan mejores resultados que por separadas al ser usadas en un proceso de hidrólisis enzimática de jugo de naranja y jugo de zanahoria.

Con base en lo anterior, se consideró como mejor alternativa el tratamiento número 3 debido a la relación entre la cantidad de enzima empleada y el comportamiento fisicoquímico obtenido. En el caso específico de la pectina, a pesar de ser un polisacárido altamente soluble en su forma nativa, otorga alta viscosidad a las soluciones donde está presente, mientras que su estado hidrolizado presenta un comportamiento de baja viscosidad en solución debido a una reducción de su capacidad de absorción de agua, aunque, conserva su alta solubilidad. Es decir, la falta de retención de agua fomenta la reducción en la viscosidad (Aline de Moura et al., 2020). Resultados similares fueron reportados por Alva et al. (2014).

9.2.3. Linealidad del tratamiento enzimático

Con la finalidad de escalar a volúmenes mayores los resultados del tratamiento enzimático (concentración de enzimas del tratamiento #3, apartado anterior), se realizó un diseño experimental completamente al azar. En la Tabla 13 se presentan los resultados de sólidos solubles y viscosidad.

Tabla 13. Diseño experimental y respuestas generadas por la enzimación del jugo de maracuyá en prueba de linealidad

Volumen (ml)	Sólidos solubles (°Brix)	Viscosidad (cP)
1000	12.73 ± 0.12^A	6.76 ± 0.00^B
500	12.83 ± 0.15^{AB}	7.13 ± 0.14^B
50	12.47 ± 0.15^B	7.85 ± 0.07^A

Se encontró que no hay diferencias significativas entre los tratamientos de mayor volumen de jugo (500 y 1000 ml). Los resultados del tratamiento enzimático dependen de la homogeneización de la muestra, ya que la hidrólisis de pectina, celulosa y hemicelulosa depende de la magnitud de ramificaciones presentes. En la literatura se reporta que la digestión química es escalable en volumen para el procesamiento de frutas, ya que las concentraciones declaradas por el fabricante se rigen de acuerdo con los factores que influyen en la actividad enzimática (Dalgo-Flores & Alvarado, 2012). Siendo así, para el montaje de un proceso de evaporación osmótica de escala de laboratorio se confirma el comportamiento lineal de la concentración de enzima en volúmenes superiores de jugo.

9.3. Clarificación

El jugo obtenido por hidrólisis enzimática se centrifugó y posteriormente se filtró al vacío. Por otro lado, el uso de floculantes como proceso de clarificación requiere la modificación del pH de jugo de ácido a casi neutro (6, 5) para tener un funcionamiento óptimo. Al comparar los resultados de Domingues et al. (2012) en la clarificación de jugo de maracuyá por hidrólisis enzimática, centrifugación y floculación con quitosano, el valor reportado de viscosidad es similar al obtenido en este trabajo (Tabla 16), ambos cercanos a la viscosidad del agua, mientras que la turbidez obtenida en dicho estudio después del tratamiento enzimático, centrifugación y floculación con quitosano tuvo un mínimo de 43 NTU. Este valor de aproximadamente la mitad el resultado aquí obtenido, pero de igual orden de magnitud. Adicionalmente, según los autores

de la referencia, el uso de velocidades de rotación superiores a 5000 rpm no mejora significativamente el proceso de clarificación.

9.3.1. Centrifugación

Para la selección del tiempo de centrifugación se realizó un diseño experimental unifactorial de una vía en función del contenido de sólidos totales. La prueba de Tuckey con 95% de confianza (Tabla 14) mostró que ninguno de los tratamientos fue significativamente diferente, por lo que, se escogió el menor tiempo (5 min). Resultados similares obtuvieron Ninga et al. (2022) en la clarificación de jugo de guayaba blanca por centrifugación, quienes establecieron que la cantidad máxima de sólidos que logran separarse dependen de la cantidad de aceleración (fuerza g) a la que la muestra es sometida.

Tabla 14. Prueba de Tuckey para tiempos de centrifugación

Tiempo (min)	Sólidos totales (%)
5	11.98 ± 0.01 ^A
10	11.83 ± 0.10 ^A
15	12.15 ± 0.08 ^A
20	12.07 ± 0.15 ^A

El jugo se centrifugó a 5000 rpm por 5 min, generando una separación de fases; una líquida traslúcida en la parte superior y otra turbia en parte inferior, permitiendo separar la mayoría de los carbohidratos de cadena larga que no fueron totalmente hidrolizados. Se filtró al vacío con un filtro cualitativo de celulosa de 8 µm, la caracterización fisicoquímica del jugo obtenido se presenta en la Tabla 15.

9.3.2. Filtración

El jugo obtenido por trituración (jugo #1) requirió de filtración por un tamiz, filtro de nylon, filtro cualitativo de celulosa de 75 µm y finalmente por un filtro cualitativo de celulosa de 8 µm con vacío de 866.6 mbar. Este proceso resultó inviable, por cuanto el filtro se colmató rápidamente. Por otra parte, el jugo despulpado, enzimado y centrifugado, pasó sin dificultad el filtro cualitativo de celulosa de 8 µm con vacío de 866.6 mbar. La filtración al vacío es utilizada a gran escala en industria para actividades con condiciones más exigentes tales como la separación de lodos en diferentes procesos de producción (González-Cedeño & Prado-Pincay, 2019).

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se seleccionó el jugo obtenido por despulpado mecánico para el proceso de concentración con membranas. Al caracterizar el tamaño de partículas de este jugo mediante el equipo Zetasizer Nano S, se encontró un tamaño promedio de $0.666 \pm 0.030 \mu\text{m}$, lo que indica que las cadenas de los principales polisacáridos presentes en el jugo de maracuyá fueron hidrolizadas parcial o totalmente y que la mayoría de la fracción no hidrolizada fue removida por centrifugación y filtración al vacío, ya que estos presentan en estado natural tamaños de partícula entre 0.5 y $1500 \mu\text{m}$ (Rendón-Rodríguez et al., 2020). En la Tabla 15 se muestran las características obtenidas en el jugo de maracuyá obtenido por trituración y despulpado tras pasar por las etapas de hidrólisis enzimática, centrifugación y filtración al vacío.

Tabla 15. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá en diferentes etapas del proceso

	Etapa	pH	Sólidos solubles (°Brix)	Acidez (g/100mL)	Sólidos totales (%)	Viscosidad (cP)	Turbidez (NTU)
Triturado	Crudo	3.02 ± 0.03	12.47 ± 0.20	3.96 ± 0.11	13.56 ± 0.01	16.77 ± 0.15	>10000
	Enzimado	3.06 ± 0.01	12.77 ± 0.10	4.22 ± 0.04	13.44 ± 0.01	6.39 ± 0.26	>10000
	Centrifugado y filtrado	3.05 ± 0.01	11.42 ± 0.13	4.02 ± 0.03	11.90 ± 0.14	1.79 ± 0.01	4286 ± 21.93
Despulpado	Crudo	2.90 ± 0.00	10.87 ± 0.12	4.16 ± 0.01	12.37 ± 0.32	9.40 ± 0.25	7308.89 ± 53.86
	Enzimado	2.91 ± 0.01	11.90 ± 0.17	4.51 ± 0.01	12.49 ± 0.60	5.06 ± 0.07	7021.67 ± 33.83
	Centrifugado y filtrado	2.92 ± 0.01	11.90 ± 0.01	4.42 ± 0.01	12.10 ± 0.68	1.44 ± 0.01	87.35 ± 0.14

Las características fisicoquímicas del jugo obtenido por despulpado (viscosidad de 1.44 ± 0.01 cP, sólidos solubles de 11.9 ± 0.01 °Brix, sólidos totales de $12.1 \pm 0.68\%$ y turbidez de 87.35 ± 0.14 NTU) son adecuadas para una posterior concentración por evaporación osmótica por membranas. Con respecto al jugo crudo (despulpado) hubo un aumento de 9.47% de sólidos solubles (1.03 °Brix), una reducción de 84.68% en viscosidad y 98.80% en la turbidez. Estos resultados son comparables con las características obtenidas por Domingues et al., 2012 y Domingues et al., 2014 tras un proceso de clarificación de jugo de maracuyá amarillo por hidrólisis enzimática y centrifugación y otro con la etapa adicional de floculación por quitosano como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá con respecto a otros trabajos de clarificación

	Proceso	Sólidos solubles (°Brix)	Viscosidad (cP)	Turbidez (NTU)
Jugo #2	Crudo	10.87 ± 0.12	9.40 ± 0.25	7308.89 ± 53.86
	Enzimado, centrifugado y filtrado	11.90 ± 0.01	1.44 ± 0.01	87.35 ± 0.14
Domingues et al., 2012	Crudo	11.8 ± 0.2	39.12 ± 5	4000 ± 85
	Enzimado y centrifugado	11.63 ± 0.09	1.91 ± 0.07	612 ± 12
	Enzimado, centrifugado (12000 rpm) y floculado	12.00 ± 0.01	1.94 ± 0.04	43 ± 9
Domingues et al., 2014	Crudo	12.60 ± 0.98	46.74 ± 6.62	3982 ± 127.95
	Enzimado y centrifugado	11.83 ± 0.49	1.90 ± 0.10	965 ± 42.50
	Enzimado, centrifugado y floculado	11.00 ± 1.74	2.45 ± 0.12	28 ± 14.21

Al analizar la tabla anterior puede concluirse que las características de sólidos solubles, viscosidad y turbidez en el jugo #2 son mejores que las reportadas por los autores hasta las etapas de enzimación y centrifugación. Sin embargo, en las etapas con adición de floculantes los resultados fueron similares, a excepción de la viscosidad, la cual es menor en el jugo #2. Lo anterior se debe al acoplamiento de las operaciones de hidrólisis enzimática y centrifugación con la operación de filtración, las cuales permiten obtener las características deseadas (solubles, viscosidad y turbidez) en el jugo, evitando la adición de una etapa de floculación y así mismo, los cambios en los parámetros del jugo que requieren para ello, lo que además implica un aumento en el riesgo de colmatación de las membranas debido al alto peso molecular de los floculantes.

Este proceso se ha utilizado por Liguori et al. (2021) como un conjunto de etapas previas de una etapa de evaporación osmótica en jugo de apio. Las anteriores características son similares a las obtenidas en etapas de clarificación previas a la operación de evaporación osmótica exceptuando la turbidez, ya que en general se trabaja con valores inferiores a 5 NTU, tal como se muestra en la Tabla 17. La alta turbidez puede deberse a una fracción compuestos coloidales no degradados por las enzimas (Martínez et al., 2017).

Tabla 17. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá con respecto a otros trabajos de evaporación osmótica

Fuente	Fruta	Proceso	Sólidos solubles (°Brix)	Viscosidad (cP)	Turbidez (NTU)
Jugo #2	Maracuyá	Enzimado, centrifugado y filtrado	11.90 ± 0.01	1.44 ± 0.01	87.35 ± 0.14
Forero et al. (2013)	Maracuyá	Enzimado y ultrafiltrado	14.11 ± 0.11	1.30 ± 0.05	1.70 ± 0.20
Dincer et al. (2016)	Morera negra	Enzimado y clarificado con floclulantes	14.5 ± 0.03	-	3.45 ± 0.05
Vaillant et al. (2005)	Melón	Enzimado y microfiltrado	7.01 ± 1.00	1.30 ± 0.10	0.61 ± 0.08

9.4. Proceso de evaporación osmótica

Generalmente se reemplaza la centrifugación por alguna técnica de filtración por membrana (micro o ultrafiltración) ya que además de clarificar, también le otorgan al jugo una esterilización no térmica, producto del reducido tamaño de poro de las membranas. Aunque su implementación es difícil para escalarse debido a los altos costos de los módulos (Ceballos & González, 2021; Solís et al., 2017). Por tal motivo, se establece a la centrifugación como una alternativa a la clarificación.

9.4.1. Montaje del sistema de evaporación osmótica

El sistema de evaporación osmótica se presenta en la Figura 11. Está formado por un módulo de fibras huecas que se describe en la Tabla 18. Para el manejo de los caudales de jugo y salmuera (CaCl₂) se emplearon bombas peristálticas de flujo variable. Para controlar las temperaturas se adaptaron baños termostáticos con flujo directo hacia condensadores encaquetados. La relación del volumen del tanque de alimentación y de salmuera es de 1:3. Para el control de las presiones se utilizaron manómetros y válvulas de estrangulación.

Tabla 18. Características de la membrana utilizada en el sistema de EO

Propiedad	Módulo
Tipo	Liqui-Cel EXF 4x13
Material de membrana	Polipropileno
Largo (mm)	500
Diámetro (mm)	25
Porosidad (%)	> 40
Área de contacto (m ²)	8.2

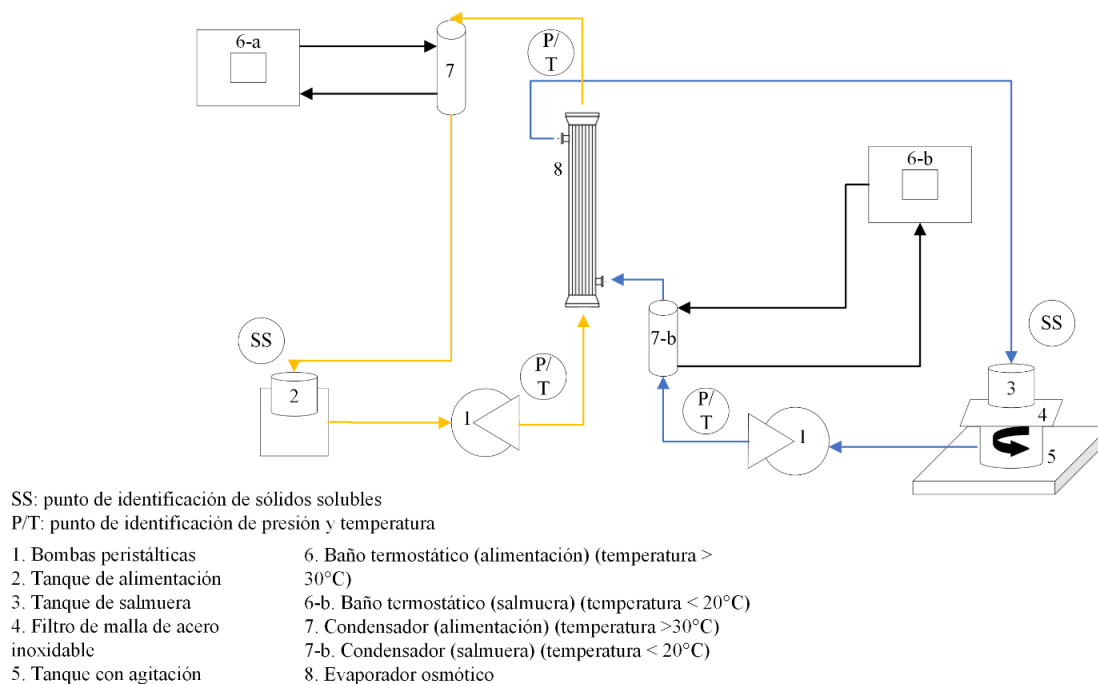


Figura 11. Esquema del sistema de evaporación osmótica

Después de las corridas experimentales, el módulo debe someterse a un procedimiento de limpieza descrito por el fabricante, el cual consta de lavados con agua, posteriores a un lavado con solución de NaOH (1% p/v) y ácido cítrico. Finalizando con un lavado del circuito con agua. El circuito construido se presenta a continuación en la Figura 12.



Figura 12. Sistema de evaporación osmótica a escala de laboratorio

El montaje y acoplamiento de equipos varían dependiendo de la cantidad de material para concentrar. El uso de tanques de mayor volumen y bombas de mayor caudal necesitan de membranas con área de contacto mayor, o en caso contrario, módulos conectados en serie para aumentar la tasa de evaporación y de esta forma disminuir el tiempo de concentración. La mayoría de los circuitos del sistema de EO convergen en la implementación de bombas, baños termostáticos y tanques, aunque, el sistema puede variar acoplando un sistema de filtración (microfiltración y ultrafiltración) para contemplar un proceso de evaporación osmótica continuo desde la clarificación (Acuña-Jimenez, 2013; Ortuño & Clar-Iborra, 2016).

9.4.2. Verificación del montaje

El jugo obtenido por despulpado (jugo #2) se concentró con las condiciones descritas en la Tabla 4, como se mencionó anteriormente, a diferencia del jugo #1 es el que cumple con las condiciones mecánicas para su paso a través de un sistema de membrana. En la Tabla 19 se presentan las características fisicoquímicas del jugo durante el proceso de concentración mediante evaporación osmótica.

Tabla 19. Características fisicoquímicas del jugo de maracuyá #2 en diferentes etapas del proceso de concentración

Etap	pH	Sólidos solubles (°Brix)	Sólidos totales (%)	Viscosidad (cP)	Turbidez (NTU)
Inicial	2.90 ± 0.00	10.87 ± 0.12	12.37 ± 0.32	9.40 ± 0.25	7309 ± 53.86
Enzimación	2.91 ± 0.01	11.90 ± 0.17	12.49 ± 0.60	5.06 ± 0.07	7022 ± 33.83
Centrifugación	2.92 ± 0.01	11.90 ± 0.01	12.10 ± 0.68	1.44 ± 0.01	87.30 ± 0.14
Concentración por E.O.	2.61 ± 0.03	63.8 ± 0.25	65.27 ± 0.44	164.43 ± 0.75	> 10000

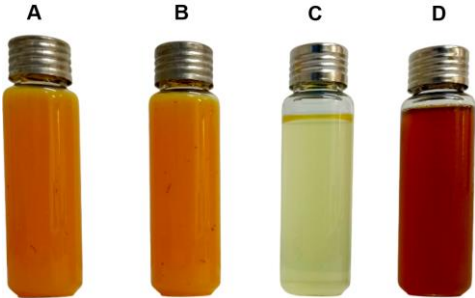


Figura 13. Jugo de maracuyá en diferentes etapas del proceso (A) despulpado, (B) enzimado, (C) clarificado, (D) concentrado

Al analizar los parámetros fisicoquímicos descritos en la Tabla 19, se aprecia que el pH disminuyó alrededor del 10% respecto al inicial, lo cual indica el aumento en la proporción de ácidos orgánicos presentes, comportamiento similar se identifica en la viscosidad (aproximadamente 20 veces mayor) y turbidez, lo que se debe a la alta remoción de agua, lo cual aumenta la concentración de pigmentos cambiando el color a tonalidades de amarillo pardo (Cassano & Drioli, 2007; Forero et al., 2013), como se observa en la Figura 13. Resultados similares se evidenciaron en la concentración de cholupa realizada por Forero et al. (2013) hasta $65.15 \pm 0,36$ °Brix durante 8 h, obteniendo turbidez del concentrado superior a 10000 NTU, explicada por el aumento en la proporción de azúcares disueltos en el concentrado. También, Mendoza et al. (2012) reporta un aumento en la acidez y disminución del pH durante la concentración de jugo clarificado de uchuva, explicada por la alta remoción de agua y concentración de compuestos ácidos.

Se logró una concentración de 63.8 °Brix, este valor es mayor a la cantidad de sólidos (60 °Brix) alcanzados en el maracuyá tras procesos térmicos como la roto evaporación a 45 °C y 25 mmHg, donde la degradación de características sensoriales ocurre tras reacciones irreversibles por efectos térmicos y alrededor del 90% de componentes volátiles se pierden tras la evaporación (Yu & Chiang, 1986). Resultados similares evidenciaron Tavares et al. (2022) tras la evaporación de jugo de uva a 90°C, concluyendo que a temperaturas mayores de 45 °C, en tiempos prolongados, las propiedades organolépticas del jugo se deterioran.

10. CONCLUSIONES

- Se evidenció que la fractura de la semilla para la obtención de jugo por trituración libera sólidos insolubles que afectan el comportamiento del jugo, además de aumentar las etapas de filtración para la remoción de éstos.
- Se encontró que los cocteles enzimáticos Natuzym-SF y Depol-40L trabajan mejor al combinarse debido a que ocurre una sinergia producto de la naturaleza pectolítica y celulítica. Se escogió la combinación de concentraciones con mejor relación de cantidad con sólidos y viscosidad. De esta forma, se demostró que es escalable para magnitudes de volumen mayores.
- La centrifugación en conjunto con la filtración al vacío es un método de clarificación efectivo, que permitió reducir en 84.68% la viscosidad y 98.80% la turbidez respecto a los valores

iniciales y se consiguió disminuir el tiempo de proceso (5 min). Además, su implementación es escalable, con la desventaja de un alto consumo energético compensado por la baja especificidad en comparación a otros métodos de clarificado.

- Se consiguieron altas eficiencias en el despulpado (21%), un tiempo de enzimación suficiente para la maceración de los tejidos celulares al igual que un método de clarificación que garantiza las propiedades fisicoquímicas y mecánicas necesarias para el procesamiento en el módulo de evaporación.
- El montaje del sistema de evaporación osmótica garantiza la concentración en continuo hasta obtener el punto de sólidos deseados (63.8 °Brix).

REFERENCIAS

1. Acuña-Jiménez, H. (2013). Desarrollo de un prototipo de un evaporador osmótico para la concentración de jugos pulposos de frutas.
2. Aguila-Tello, W. (2022). Efecto del zumo de maracuyá (*passiflora edulis*) como agregado en las características organolépticas durante el proceso de fermentación del cacao CCN51 (*Theobroma cacao L.*).
3. Alfaro, M., Vicente, S., & Villar, K. (2019). Evaluación del efecto de la pasteurización y concentración sobre la calidad microbiológica, organoléptica y contenido de betalainas de un jugo de vegetales fresco.
4. Aline de Moura, F., Macagnan, F. T., Lúcia de Oliveira Petkowicz, C., & Picolli da Silva, L. (2020). Partially hydrolyzed pectin extracted from passion fruit peel: Molar mass and physicochemical properties. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 21, 100206.
5. Almeida, C., Carrillo, I., Chamorro, S., & Palacios-Cabrera, T. (2019). Diseño de una planta piloto de extracción de pectina como gelificante a partir de residuos de la naranja (*Citrus Sinensis*).
6. Alva, B., Condori, Q., Baigorria, S., & Gordillo, C. (2014). Enzymatic liquefaction and characterization of the rheological properties of pulp yellow passionfruit (*Passiflora edulis var. flavicarpa*).
7. Arias-Domínguez, E., López-Basurto, M., Ponce-Terán, K. (2019). Análisis de los flujos comerciales de maracuyá (fruta fresca y derivados) con incidencia hacia los mercados de Europa y Estado Unidos.
8. Ávila-De Hernández, R., & Bullón-Torrealba, J. (2013). La concentración de jugos de fruta: aspectos básicos de los procesos sin y con membrana. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(3), 65–75.
9. Badui, S. (2006). *Química de los alimentos*, 4ta Edicion.
10. Biocatalists, 2015. Depol™ 40L (D040L).
11. Bonilla, E. (2005). Concentración de jugo de piña por congelación y determinación de sus propiedades fisicoquímicas.
12. Calderón, K., & Morán, D. (2017). Optimización del contenido de compuestos bioactivos en el néctar mixto elaborado a partir de zumos de maracuyá (*Passiflora edulis*), carambola (*Averrhoa carambola*) y mango (*Mangifera indica*) utilizando el diseño de mezclas.
13. Camacho-Chiriboga, M. E. (2010). Obtención de un concentrado proteico del suero de la leche de vaca utilizando tecnología de membranas.
14. Cassano, A., Conidi, C., & Drioli, E. (2020). A comprehensive review of membrane distillation and osmotic distillation in agro-food applications. In *Journal of Membrane Science and Research* (Vol. 6, Issue 3, pp. 304–318). Amirkabir University of Technology - Membrane Processes Research Laboratory.
15. Cassano, A., & Drioli, E. (2007). Concentration of clarified kiwifruit juice by osmotic distillation. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1397–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.021>.
16. Cavalieri de Alencar Guimarães, N., Glienke, N. N., Silva Galeano, R. M., Ruller, R., Zanoelo, F. F., Masui, D. C., & Giannesi, G. C. (2022). Polygalacturonase from *Aspergillus japonicus* (PGAj): Enzyme production using low-cost carbon source, biochemical properties and application in clarification of fruit juices. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 102233. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2021.102233>.

17. Ceballos, A., & González, L. (2021). Efecto de la concentración de jugo en el rendimiento de espaciadores multicapa en destilación con membrana.
18. Cerquera-Peña, N., Parra-Coronado, A., & Camacho-Tamayo, J. (2012). Determination of drying variables in sheets for the dehydration of yellow passion fruit pulp.
19. Chan, W.-Y., & Chiang, B.-H. (1992). Production of clear guava nectar.
20. Chía-Concepción, C., Sotelo-Ganoza, K., Castillo-Calderón, A., & Diestra- Balta, J. (2023). Optimización del proceso de hidrólisis enzimática de dextrano en jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) utilizando la metodología de superficie de respuesta. *Revista Bio Ciencias*, 10. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1421>.
21. CODEX STAN 275 (2005). Norma general para zumos (jugos) y néctares de frutas.
22. Crisóstomo, O., Encina, C., Aguirre, D., & Silva, A. (2015). Evaluación del proceso de licuefacción enzimática de arilos de pulpa de maracuyá (*Passiflora edulis Simms*, var. *flavicarpa*). In *Rev. Per. Quím. Ing. Quím* (Vol. 18, Issue 1).
23. Cuartas-Urbe, B. (2005). Estudio del proceso de nanofiltración para la desmineralización de lactosuero dulce.
24. Dalgo-Flores, V., & Alvarado, J. (2012). Obtención de un concentrado con bromelina a partir de piña (*ananas comosus*), y determinación de su actividad enzimática en sustratos proteínicos.
25. Del Moral, S., Ramírez-Coutiño, L., & García-Gómez, M. (2015). Aspectos relevantes del uso de enzimas en la industria de los alimentos.
26. Dincer, C., Tontul, I., & Topuz, A. (2016). A comparative study of black mulberry juice concentrates by thermal evaporation and osmotic distillation as influenced by storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.012>.
27. Domingues, R. C. C., Faria Junior, S. B., Silva, R. B., Cardoso, V. L., & Reis, M. H. M. (2012). Clarification of passion fruit juice with chitosan: Effects of coagulation process variables and comparison with centrifugation and enzymatic treatments. *Process Biochemistry*, 47(3), 467–471. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.12.002>
28. Domingues, R. C. C., Ramos, A. A., Cardoso, V. L., & Reis, M. H. M. (2014). Microfiltration of passion fruit juice using hollow fibre membranes and evaluation of fouling mechanisms. *Journal of Food Engineering*, 121(1), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.037>
29. Dova, M. I., Petrotos, K. B., & Lazarides, H. N. (2007). On the direct osmotic concentration of liquid foods. Part I: Impact of process parameters on process performance. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.010>.
30. Durán-Salazar, G. M., & Alcívar-Mayor, J. A. (2020). La cadena de valor en el proceso agrícola de maracuyá. *ECA Sinergia*, 11(2), 108. https://doi.org/10.33936/eca_sinergia.v11i2.2415.
31. Escalante, A., Rosario-Retamoza, P., & Franco-López, E., Guadalupe-Martínez, J., Toríz, G., (2021). Hidrogeles antibacterianos a partir de xilanas del agave tequilero con nanopartículas de plata generadas in-situ. *Revista Ingeniantes*, 8(2), 1.
32. FAO. (2023). Principales Frutas Tropicales. Análisis del mercado. Resultados preliminares 2022.
33. Flores-Salazar, E. (2017). Diseño de una planta para el procesamiento de concentrado congelado de maracuyá (*passiflora edullis*) por evaporación osmótica.
34. Flórez-Pardo, L., Fernández, A., & Navarrete, N. (2012). Hidrólisis enzimática de los sólidos insolubles de la pulpa de maracuyá. *Alimentos Hoy* 10(10), 3-13.

35. Forero, F. & Vélez, C. A. (2013). Optimización de la concentración por evaporación osmótica del jugo de maracuyá (*Passiflora edulis*). 80, 90–98.
36. Franchi, L., Cesano, M., Pose, G., & Cavalitto, S. (2015). Análisis de la maceración enzimática de zapallo empleando protopectinasa-SE de *Geotrichum Klebahnii* y PGzyme de *Apergillus sojae*.
37. Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (2017). Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, 11, 1–4. <https://doi.org/10.17533/UDEA.RCM.328779>.
38. García, A. R., Balbín, M. I., Cabrera, J. C., & Castelví, A. (2002). Actividad endopoligalacturonasa de un preparado de la levadura *Kluyveromyces marxianus* aislada de la pulpa del café. *Cultivos Tropicales* (Vol. 23, Issue 1).
39. García, M., Suarez, S., Carcelen, F., & Olazabal, J. (2019). Effect of Temperature and pH on the Activity of the Hydrolytic Enzymes of the Cecal Region of Guinea Pig (*Cavia porcellus*). In *Arch. Zootec* (Vol. 68, Issue 263).
40. García-Rujano, T., Torres, A., Fernández, J., & Martínez, J. (2015). Pretreatment evaluation of enzymatic process filtration in a mango bocado juice. <https://www.researchgate.net/publication/305172201>
41. Gómez-Caturla, J. (2019). Diseño de una unidad de evaporación multiefectos para la concentración de zumo de granada.
42. González-Cedeño, G. A., & Prado-Pincay, L. E. (2019). Elaboración de equipo piloto a escala para el tratamiento de lodos residuales para determinar el porcentaje de humedad y la eficiencia del método.
43. Gostoli, C. (1999). Thermal effects in osmotic distillation. *Journal of Membrane Science* (Vol. 163).
44. Gutiérrez-Rojas, I., Moreno-Sarmiento, N., & Montoya, D. (2015). Mecanismos y regulación de la hidrólisis enzimática de celulosa en hongos filamentosos: casos clásicos y nuevos modelos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 32(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.RIAM.2013.10.009>.
45. Hermosa-Díaz, P. E. (2021). Últimos avances en el tratamiento de suero lácteo con tecnología de membranas (Realidad en el Ecuador).
46. Hongvaleerat, C., Cabral, L., Dornier, M., Reynes, M., & Ningsanond, S. (2008). Concentration of pineapple juice by osmotic evaporation. *Journal of Food Engineering* (88), pp. 548 – 552.
47. International Trade Center. (2023). Trade Map: Lista para un producto importado por Colombia en 2022. Producto: 2009 Jugos de frutas u otros frutos.
48. Johnson, R. A., Robert A. & Nguyen, M. H. (2017). Understanding membrane distillation and osmotic distillation.
49. Juárez, O. (2012). Elaboración de un concentrado para bebidas a base de pulpa de banano de rechazo con saborizantes artificiales.
50. Kumar, D., Ladaniya, M. S., Gurjar, M., Mendke, S., & Kumar, S. (2020). Osmotic membrane distillation for retention of antioxidant potential in Nagpur mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit juice concentrate. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13096>.
51. Laverde-Acurio, J. L., Grandes, B.-B., & Ruales, J. (2010). Estudio de las condiciones óptimas para la obtención de jugo clarificado de arazá (*Eugenia Stipitata*), mediante procesos enzimático y membranario.
52. Liguori, L., Russo, P., & Albanese, D. (2021). Production of highly valued vegetable juice by osmotic distillation technique: Optimization of process parameters. *Chemical Engineering Transactions*, 87, 331–336. <https://doi.org/10.3303/CET2187056>

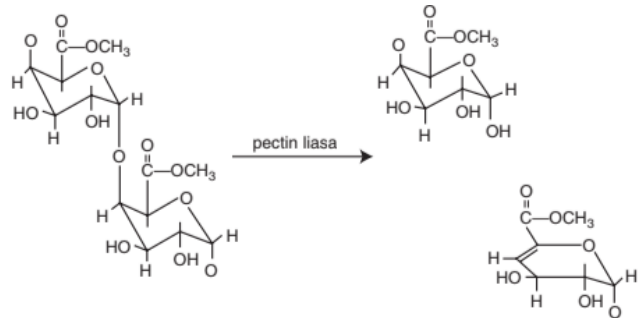
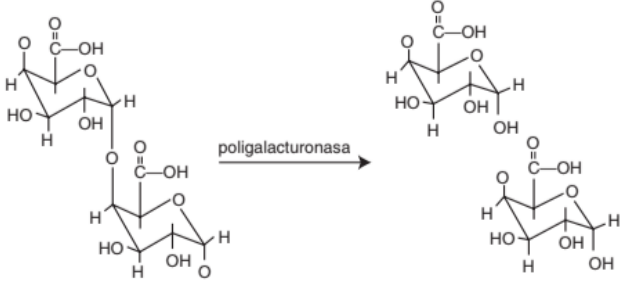
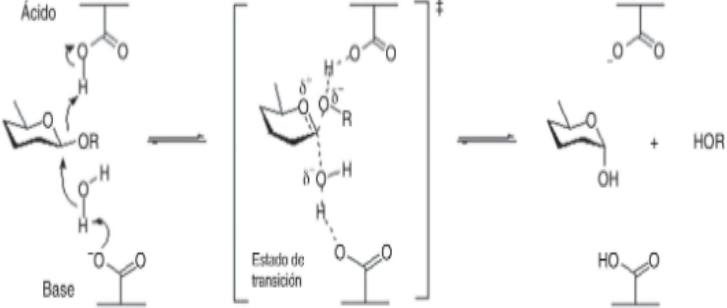
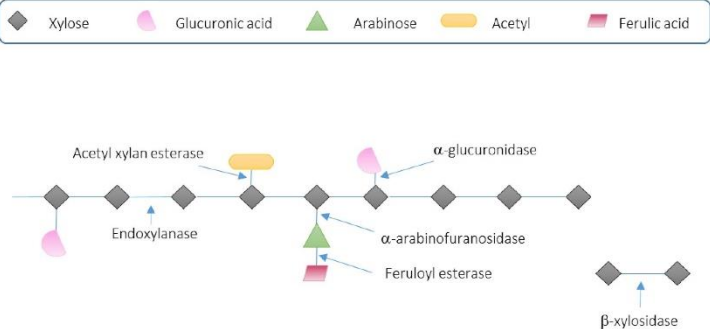
53. López-Ráez, L. E., Torres-Zavala, N. G., & Dávila-Solar, L. A. (2021). Utilización de residuos del procesamiento de jugo de maracuyá (*Passiflora edulis*) para consumo humano. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 8, 119–135. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202102.006>.
54. Margarita, K., & Fuentes, C. (2012). Microencapsulación del jugo de mango (*Mangifera indica* L.) para la obtención de un concentrado con la utilización de maltodextrina como material pared.
55. Market.Biz (2023). Mercado global de concentrados de jugo por tipo (concentrados de jugo de frutas y concentrados de jugo de vegetales), por aplicación (bebidas, panadería y confitería, sopas y salsas y lácteos), por país y fabricación, segmento industrial, escenario de competencia y pronóstico para 2032.
56. Martínez, K., Cazorla, A., Escobar, J., & Alvarado, C. (2017). Preparación de un jugo clarificado de frutas utilizando un concentrado enzimático de guayaba y papaya. *Ingeniería y Sociedad UC* (Vol. 12, Issue 1).
57. Matute, N. L., & Echavarría, A., P. (2018). Evaluación fisicoquímica y capacidad antioxidante de moringa (*Moringa oleífera*) y maracuyá (*Passiflora edulis*). *Revista Cumbres* (Vol. 4). <http://investigacion.utmachala.edu.ec/revistas/index.php/Cumbres>
58. Mendoza-Corvis, F. A., Hernández, E. J., & Ruiz, L. E. (2015). Efecto del escaldado sobre el color y cinética de degradación térmica de la vitamina C de la pulpa de mango de hilacha (*Mangifera indica* var. *magdalena river*). *Información Tecnológica*, 26(3), 9–16. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300003>.
59. Mendoza, J. H., Vélez, C., & Millán, P. (2012). Concentración de clarificado de uchuva (*physalis peruviana*) por destilación osmótica: efecto de los parámetros de operación sobre la concentración. *Vitae*, 19(1), S45-S47.
60. Minchola, A. A., García Vásquez, J., García, A., Oswaldo, J., Ávila, R., Cortavitarre, R. I., Bartolo Rodríguez, L., & Revoredo, P. R. (2012). Evaluation of the use of enzymes and vacuum filtration for clarification of a dilute mixture of pulp Sancayo (*Corryocactus brevistylus*) and pear (*Opuntia ficus-indica*) at different temperatures.
61. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo.
62. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena de pasifloras. Indicadores e instrumentos Segundo Trimestre 2021. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
63. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). Abastecimiento de alimentos en centrales mayoristas en Marzo de 2023.
64. Ministerio de Salud y Protección Social (2013). Resolución 3929 de 2013.
65. Ninga, K. A., Desobgo, S. C. Z., Nso, E. J., & Kayem, J. (2022). White-flesh guava juice clarification by a fixed-angle conical rotor centrifuge laboratory and characterization of continuous disk stack centrifuges. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11606>.
66. Norma Técnica Colombiana, N. 5468. (2012). Jugo (Zumo), Pulpa, Néctar de Fruta y sus Concentrados. <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/pdfview/viewer.aspx?locale=es-ES&Q=C5FC4DD1F63359260EAA3EAA6AF517201BEDC311C8548E0A&Req=>.
67. Ongaratto, R. S., Menezes, L., Borges, C. P., & Laranjeira da Cunha Lage, P. (2018). Osmotic distillation applying potassium pyrophosphate as brine. *Journal of Food Engineering*, 228, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.013>.

68. Onsekizoglu-Bagci, P., Kahvecioglu, H., Gulec, H. A., & Bagci, U. (2020). Pomegranate juice concentration through the consecutive application of a plasma modified reverse osmosis membrane and a membrane contactor. *Food and Bioproducts Processing*, 124, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.003>
69. Ortuño, I., & Clar-Iborra, M. (2016). Optimización de las condiciones de operación de las etapas de concentración/clarificación de zumos por tecnología de membranas.
70. Ovando-Chacón, S., & Waliszewski, K. (2005). Preparativos de celulasas comerciales y aplicaciones en procesos extractivos.
71. Pantoja-Chamorro, A. L., Hurtado-Benavides, A. M., Martinez-Correa, H. A. (2017). Caracterización de aceite de semillas de maracuyá (*Passiflora edulis Sims.*) procedentes de residuos agroindustriales obtenido con CO₂ supercrítico. *Acta Agronómica*, 66(2), 178–185. <https://doi.org/10.15446/ACAG.V66N2.57786>.
72. Peñafiel-Arcos, F. E. (2015). Composición química y degradabilidad ruminal in situ de subproductos de maracuyá (*Passiflora edulis*) y plátano (*Musa AAB*).
73. Pulido-Díaz, A. P., Forero, F. & Cabrera-Navarro, S. A. (2016). Evaporación osmótica: fundamentos y aplicaciones en la concentración de jugos de fruta. *Biotechnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 135. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)135-144](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)135-144).
74. Qin, F. G. F., Ding, Z., Peng, K., Yuan, J., Huang, S., Jiang, R., & Shao, Y. (2021). Freeze concentration of apple juice followed by centrifugation of ice packed bed. *Journal of Food Engineering*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110270>.
75. Rehman, W. U., Muhammad, A., Khan, Q. A., Younas, M., & Rezakazemi, M. (2019). Pomegranate juice concentration using osmotic distillation with membrane contactor. *Separation and Purification Technology*, 224, 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.055>.
76. Rendón-Rodríguez, K., Azocar-Barreto, E., Castillo-Campos, L. (2020). Pectina deshidratada de *Passiflora edulis* como inhibidor de incrustaciones minerales. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(1), 1–12. <https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2020.21N1.010>.
77. Restrepo-Osorio, J. (2015). *Química de los alimentos, un enfoque integral* (1st ed., Vol. 1). Universidad del Valle.
78. Rivera-Pérez, C., & García-Carreño, F. (2007). *Enzimas lipolíticas y su aplicación en la industria del aceite* (Vol. 11, Issue 2).
79. Rodríguez-Gàmez, O., & Serrat-Díaz, M. (2008). Poligalacturonasas de levaduras: un producto biotecnológico de grandes potencialidades.
80. Rodríguez-Arzave, J. A., Florido-Aguilar, A. L., & Hernández-Torres, M. A. (2020). Determinación de parámetros fisicoquímicos en jugos de frutas cítricas.
81. Roncancio-Parra, D. (2015). Estudio sobre la aplicación de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
82. Ruilova-Carrión, C. E., León-Arbulú, D. C., & Tay Chu Jon, L. Y. (2018). Potencial erosivo de jugos naturales, jugos industrializados y gaseosas.
83. Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). *Membrane technology: Ultrafiltration*. In *Entre Ciencia e Ingeniería*.
84. Sotto-Díaz, A. (2008). Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos.

85. Tavares, H. M., Tessaro, I. C., & Cardozo, N. S. M. (2022). Concentration of grape juice: Combined forward osmosis/evaporation versus conventional evaporation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102905>.
86. Toaquiza-Toapanta, A. M. (2011). Evaluación del efecto de enzimas (gluco-oxidasas, hemicelulasas) y emulsificante (estearil lactilato de sodio) en la calidad de pan elaborado con sustitución parcial de harina de trigo nacional (*Triticum vulgare*) variedad Cojitambo.
87. Torrez-Palazzolo, C. (2015). Determinación de la contaminación con *Zygosaccharomyces rouxii* durante la elaboración de jugos de uva concentrados.
88. Tupuna, S., Edwin, V., & Ruales, J. (2016). Obtención de jugo clarificado concentrado de mortiño (*Vaccinium floribundum Kunth*) mediante el uso de tecnología de membranas.
89. Urango-Anaya, K. J., Ortega-Quintana, F. A., Vélez-Hernández, G., & Pérez-Sierra, Ó. A. (2018). Extracción rápida de pectina a partir de cáscara de maracuyá (*passiflora edulis flavicarpa*) empleando microondas. *Información Tecnológica*, 29(1), 129–136. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000100129>.
90. Vaillant, F., Cisse, M., Chaverri, M., Perez, A., Dornier, M., Viquez, F., & Dhuique-Mayer, C. (2005). Clarification and concentration of melon juice using membrane processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6(2), 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.11.004>.
91. Vaillant, F., Jeanton, E., Dornier, M., O'brien, G. M., Reynes, M., & Decloux, M. (2001). Concentration of passion fruit juice on an industrial pilot scale using osmotic evaporation. www.elsevier.com/locate/jfoodeng.
92. Valdés, H., Romero, J., Saavedra, A., Plaza, A., & Bubnovich, V. (2009). Concentration of noni juice by means of osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 330(1–2), 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.12.053>.
93. Valencia, A., Acurio, L., Pérez, L., Salazar, D., & Tamayo, V. (2015). Formulation and characterization of a nutritional pumpkin-based whey beverages, enriched with oatmeal and passion fruit. 55–66. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>.
94. Vigié, J., Savart, T., Duru, P., Rouch, J. C., & Remigy, J. C. (2013). Characterisation of 3D porous macrostructure of hollow fibre membranes using X-ray tomography-Effects of some spinning process conditions. *Journal of Membrane Science*, 435, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.062>.
95. Weiss Bio Tech, 2022. NATUZYM® SF Product Data Sheet.
96. Yu, Z. R., & Chiang, B. H. (1986). Passion fruit juice concentration by ultrafiltration and evaporation. *Journal of Food Science*, 51(6), 1501-1505.
97. Zambra, C., Romero, J., Pino, L., Saavedra, A., & Sanchez, J. (2014). Concentration of cranberry juice by osmotic distillation process. *Journal of Food Engineering*, 144, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.07.009>

ANEXOS

Apéndice 1. Reacciones enzimáticas

Enzima	Reacción	Fuente
Pectinliasa		Rodriguez Gàmez & Serrat Díaz, 2008
Poligalacturonasa		Rodriguez Gàmez & Serrat Díaz, 2008
Celulasa		Gutiérrez-Rojas et al., 2015
Hemicelulasa		Méndez-Líter et al., 2021