

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CÁSCARA DE NARANJA PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITE ESENCIAL Y PECTINA BAJO UN ENFOQUE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Miguel Yucra Rojas ¹ Reyna Zeila Rios Flores ²

1. Instituto de Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia
myucra333@gmail.com
2. Carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

RESUMEN

La generación de residuos agroindustriales provenientes de la industrialización de frutas cítricas representa un desafío ambiental y una oportunidad para la valorización de biomasa dentro de los principios de la economía circular. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo diseñar y evaluar un proceso integral para el aprovechamiento de la cáscara de naranja mediante la extracción secuencial de aceite esencial y pectina, bajo un enfoque de valorización de residuos. La metodología comprendió la realización de ensayos experimentales utilizando un kilogramo de cáscara de naranja fresca, empleando destilación por arrastre de vapor para la obtención de aceite esencial e hidrólisis ácida para la extracción de pectina. Posteriormente, el proceso fue modelado y validado mediante simulación en Aspen Plus V11.1, permitiendo su escalamiento a una capacidad de procesamiento de una tonelada de materia prima. Los resultados experimentales alcanzaron rendimientos de hasta 0,66 % para aceite esencial y 20,0 % para pectina, equivalentes al 54 % y 49,7 % del rendimiento teórico, respectivamente. La simulación reprodujo adecuadamente el comportamiento del proceso y evidenció la viabilidad técnica de su escalamiento industrial, obteniendo rendimientos similares a los experimentales. Se concluye que la integración de ambos procesos constituye una alternativa técnicamente factible para el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja, contribuyendo a la reducción de residuos, la generación de productos de valor agregado y la incorporación de estrategias de economía circular en la industria agroalimentaria.

Palabras clave: economía circular, valorización de residuos, cáscara de naranja, aceite esencial, pectina, destilación por arrastre de vapor, hidrólisis ácida.

1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos de producción sostenibles constituye uno de los principales desafíos para la industria agroalimentaria debido al incremento continuo en la generación de residuos orgánicos y al impacto ambiental asociado con su disposición final. En este contexto, la **economía circular** propone reemplazar el modelo lineal tradicional de “extraer–producir–desechar” por sistemas orientados al uso eficiente de los recursos, promoviendo la reutilización, recuperación y valorización de subproductos como materias primas para nuevos procesos industriales. Este enfoque contribuye simultáneamente a la reducción de residuos, al aprovechamiento integral de los recursos naturales y a la generación de valor agregado dentro de las cadenas productivas (Teigiserova et al., 2021).

Dentro de este paradigma, los residuos agroindustriales han adquirido un papel estratégico debido a su elevado contenido de compuestos bioactivos con potencial aplicación industrial. Entre ellos, los residuos derivados del procesamiento de frutas cítricas representan una de las fracciones de mayor interés por su disponibilidad, composición química y posibilidades de aprovechamiento mediante tecnologías sostenibles. La industria de jugos y derivados genera grandes volúmenes de cáscaras, pulpa y semillas que pueden representar entre el 50 % y el 60 % del peso total del fruto, dependiendo de la especie, la variedad y el proceso industrial empleado. Tradicionalmente estos residuos han sido destinados a alimentación animal, compostaje o eliminación, desaprovechando su potencial para la obtención de productos de alto valor agregado (Rawat et al., 2024).

La naranja (*Citrus sinensis*) constituye uno de los cultivos frutales de mayor importancia económica a nivel mundial. Además de su amplio consumo en fresco, es la principal materia prima para la elaboración de jugos, concentrados, bebidas, mermeladas y otros productos industrializados. Como consecuencia, el procesamiento industrial genera cantidades significativas de cáscara de naranja, considerada actualmente una biomasa con elevado potencial para el desarrollo de procesos de biorrefinería. Diversas investigaciones coinciden en que este subproducto contiene compuestos de interés comercial como aceites esenciales, pectinas, flavonoides, compuestos fenólicos, carotenoides, fibra dietaria y azúcares estructurales, susceptibles de ser recuperados mediante tecnologías de extracción física, química y biotecnológica (Chandrasekar et al., 2024).

El aprovechamiento de estos residuos se encuentra estrechamente relacionado con el concepto de **valorización**, entendido como el conjunto de estrategias orientadas a transformar un residuo en un recurso con utilidad económica, ambiental y tecnológica. Actualmente, la valorización de residuos cítricos constituye una de las líneas de investigación con mayor crecimiento dentro de la bioeconomía circular, debido a que permite disminuir la carga ambiental del procesamiento

agroindustrial y, al mismo tiempo, generar nuevas fuentes de ingresos mediante la recuperación de compuestos de alto valor comercial (Ranjha et al., 2022).

Entre los compuestos de mayor interés industrial obtenidos a partir de la cáscara de naranja destacan el aceite esencial y la pectina. El aceite esencial está constituido principalmente por D-limoneno, acompañado de otros monoterpenos y compuestos oxigenados que le confieren propiedades aromáticas, antioxidantes y antimicrobianas. Estas características han favorecido su aplicación en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica, química y de productos de limpieza. Paralelamente, la pectina representa uno de los biopolímeros naturales de mayor demanda debido a sus propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes, siendo ampliamente utilizada en alimentos, productos farmacéuticos, biomateriales y envases biodegradables (Rawat et al., 2024).

La creciente demanda de estos compuestos ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías de extracción. Para la obtención de aceite esencial se han empleado métodos convencionales, como prensado en frío, hidrodestilación y destilación por arrastre de vapor, además de tecnologías emergentes basadas en microondas, ultrasonido y fluidos supercríticos. En el caso de la pectina, las investigaciones recientes se orientan hacia procesos de extracción asistida que incrementan el rendimiento, reducen el consumo energético y disminuyen el uso de solventes, respondiendo a los principios de la química verde y de la producción sostenible (Grover et al., 2024; Chandrasekar et al., 2024).

No obstante, una revisión de la literatura evidencia que una gran parte de las investigaciones se concentra en la recuperación individual de un único compuesto de interés, mientras que son relativamente escasos los estudios orientados al **aprovechamiento secuencial e integral** de la cáscara de naranja mediante procesos que permitan recuperar varios productos dentro de una misma cadena tecnológica. Esta estrategia, conocida como **cascading valorization** o valorización en cascada, constituye uno de los principios fundamentales de las biorrefinerías modernas, ya que maximiza el aprovechamiento de la biomasa, reduce la generación de residuos y mejora la rentabilidad de los procesos industriales (Teigiserova et al., 2021).

Adicionalmente, otro aspecto poco abordado en la literatura corresponde a la integración entre la experimentación de laboratorio y la simulación de procesos para evaluar la factibilidad técnica del escalamiento industrial. El empleo de herramientas de simulación, como Aspen Plus, permite analizar balances de materia y energía, estimar requerimientos operativos y optimizar el diseño antes de una implementación industrial, reduciendo costos de desarrollo y riesgos tecnológicos. Sin embargo, son limitadas las investigaciones que combinan la validación experimental con

modelos de simulación aplicados específicamente al aprovechamiento integral de residuos cítricos (Teigiserova et al., 2021).

En Bolivia, la industrialización de cítricos se ha incrementado en los últimos años como respuesta al crecimiento del mercado de jugos, bebidas y alimentos procesados. Sin embargo, la mayor parte de la cáscara de naranja generada continúa destinándose a usos de bajo valor agregado, principalmente alimentación animal o disposición como residuo orgánico. Esta situación representa una oportunidad para desarrollar alternativas tecnológicas que permitan incorporar principios de economía circular dentro de la industria nacional, transformando un residuo agroindustrial en fuente de materias primas para la obtención de productos de alto valor agregado.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño y evaluación de un proceso integral para la valorización de la cáscara de naranja mediante la extracción secuencial de aceite esencial y pectina utilizando destilación por arrastre de vapor e hidrólisis ácida, respectivamente. Asimismo, el proceso experimental fue modelado mediante simulación en Aspen Plus con el propósito de analizar su comportamiento y evaluar su potencial de escalamiento industrial. La propuesta busca contribuir al desarrollo de estrategias de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales, promoviendo la implementación de principios de economía circular y producción sostenible en la industria alimentaria.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria agroalimentaria enfrenta el desafío de incrementar la eficiencia en el aprovechamiento de materias primas y reducir la generación de residuos, en concordancia con los principios de sostenibilidad, economía circular y bioeconomía. Entre los residuos de mayor generación se encuentran los provenientes del procesamiento industrial de frutas cítricas, particularmente la cáscara de naranja, cuya composición química evidencia un elevado contenido de compuestos de interés industrial, como aceites esenciales, pectinas, flavonoides y compuestos fenólicos. No obstante, una parte importante de este material continúa siendo destinada a usos de bajo valor agregado o a disposición final, desaprovechando su potencial para la obtención de productos de mayor valor comercial (Rawat et al., 2024).

La valorización de residuos agroindustriales constituye actualmente una de las principales estrategias para avanzar hacia sistemas productivos sostenibles. La Comisión Europea ha señalado que la incorporación de modelos de economía circular en la industria permite reducir la presión sobre los recursos naturales, disminuir la generación de residuos y mejorar la competitividad

mediante el aprovechamiento eficiente de materiales secundarios (European Commission, 2023). En este contexto, la cáscara de naranja representa una biomasa con características favorables para el desarrollo de procesos integrados de recuperación de compuestos bioactivos.

Las investigaciones desarrolladas durante los últimos años han demostrado la viabilidad técnica de extraer aceite esencial o pectina de manera independiente utilizando diferentes tecnologías, tales como destilación por arrastre de vapor, prensado en frío, hidrólisis ácida, extracción asistida por ultrasonido y extracción asistida por microondas (Chandrasekar et al., 2024; Grover et al., 2024). Sin embargo, la mayor parte de estos estudios se centra en la optimización de un único proceso de extracción, sin considerar el aprovechamiento secuencial de la misma materia prima para obtener múltiples productos dentro de un esquema integral de valorización.

Esta situación evidencia una brecha tecnológica entre el potencial de aprovechamiento de la biomasa y las alternativas implementadas a nivel industrial. Desde la perspectiva de las biorrefinerías, la recuperación secuencial de compuestos de alto valor agregado permite incrementar significativamente la eficiencia del proceso, mejorar el aprovechamiento de la materia prima y minimizar la generación de residuos finales, principios que coinciden con los enfoques actuales de economía circular y producción sostenible (Teigiserova et al., 2021).

En Bolivia, el procesamiento industrial de naranja destinado principalmente a la elaboración de jugos y bebidas genera cantidades importantes de cáscara como subproducto. No obstante, la ausencia de procesos industriales integrados para su valorización limita el aprovechamiento de este recurso y reduce las oportunidades para diversificar la producción agroindustrial mediante la obtención de ingredientes naturales de alto valor agregado. Asimismo, son escasos los estudios nacionales que integren la validación experimental con herramientas de simulación de procesos que permitan evaluar la factibilidad técnica de un eventual escalamiento industrial.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar una alternativa tecnológica que permita integrar la extracción secuencial de aceite esencial y pectina a partir de la cáscara de naranja, aprovechando de manera más eficiente este residuo agroindustrial y generando información técnica que facilite su futura implementación industrial. La integración de procesos no solo contribuiría a incrementar el valor económico del residuo, sino también a reducir la cantidad de desechos generados y favorecer la transición hacia modelos de producción más sostenibles.

A partir de esta problemática se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es técnicamente viable diseñar y evaluar un proceso integral para la valorización de la cáscara de naranja mediante la extracción secuencial de aceite esencial y pectina, que permita maximizar el aprovechamiento de este residuo agroindustrial y demuestre su potencial de escalamiento industrial bajo los principios de la economía circular?

Con base en esta interrogante, la presente investigación propone el diseño, validación experimental y simulación de un proceso integrado orientado al aprovechamiento de la cáscara de naranja como materia prima para la obtención de aceite esencial y pectina, evaluando su desempeño técnico y su contribución a la valorización de residuos agroindustriales.

3. OBJETIVO GENERAL:

Diseñar y evaluar un proceso integral para la valorización de la cáscara de naranja mediante la extracción secuencial de aceite esencial y pectina, utilizando destilación por arrastre de vapor e hidrólisis ácida, con el propósito de determinar su viabilidad técnica y su potencial de escalamiento industrial bajo un enfoque de economía circular.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a) Caracterizar la cáscara de naranja como materia prima, identificando sus propiedades fisicoquímicas y el contenido de compuestos de interés para la obtención de aceite esencial y pectina.
- b) Diseñar un proceso integral de aprovechamiento de la cáscara de naranja, integrando las operaciones unitarias necesarias para la extracción secuencial de aceite esencial y pectina bajo criterios de valorización de residuos.
- c) Evaluar experimentalmente el proceso propuesto mediante la extracción de aceite esencial por destilación con arrastre de vapor y la obtención de pectina mediante hidrólisis ácida, determinando los principales parámetros operacionales y los rendimientos alcanzados.
- d) Modelar y validar el proceso integral mediante simulación en Aspen Plus, comparando los resultados obtenidos con los datos experimentales para verificar la consistencia del modelo.

- e) Analizar la factibilidad técnica del escalamiento industrial del proceso integrado, considerando los rendimientos obtenidos, la integración de operaciones y su contribución al aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. ECONOMÍA CIRCULAR Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Durante las últimas décadas, el crecimiento de la producción agroindustrial ha estado acompañado por un incremento significativo en la generación de residuos orgánicos. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), una proporción considerable de la biomasa producida durante el procesamiento de alimentos no llega al consumidor final y es descartada como subproducto o residuo, representando pérdidas económicas y una fuente importante de impactos ambientales asociados a la disposición final y a las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2022).

Frente a este escenario, la **economía circular** ha emergido como uno de los modelos de producción y consumo más relevantes para promover un desarrollo industrial sostenible. A diferencia del modelo económico lineal tradicional, basado en la secuencia *extraer–producir–consumir–desechar*, la economía circular propone mantener los materiales, productos y recursos dentro del sistema productivo durante el mayor tiempo posible mediante estrategias de reutilización, reparación, remanufactura, reciclaje y valorización. Este enfoque busca reducir la extracción de materias primas vírgenes, minimizar la generación de residuos y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales (Kirchherr et al., 2017).

En el ámbito agroindustrial, la economía circular ha impulsado la adopción de tecnologías orientadas al aprovechamiento integral de la biomasa residual, favoreciendo el desarrollo de procesos capaces de transformar residuos en materias primas para nuevas cadenas de producción. Esta transición no solo responde a criterios ambientales, sino también a una lógica económica que busca incrementar el valor agregado de los subproductos, diversificar las fuentes de ingresos y mejorar la competitividad de las industrias agroalimentarias (European Commission, 2023).

Uno de los conceptos fundamentales asociados a este modelo es la **valorización de residuos**, definida como el conjunto de operaciones destinadas a recuperar materiales, compuestos químicos o energía a partir de residuos que anteriormente eran considerados desechos. La valorización constituye un elemento esencial de la bioeconomía circular, ya que permite

reincorporar materiales de origen biológico al ciclo productivo mediante procesos física, química o biotecnológicamente viables. En este contexto, los residuos dejan de representar un problema ambiental para convertirse en recursos estratégicos con potencial de aprovechamiento industrial (Ranjha et al., 2022).

Los residuos agroindustriales poseen un elevado interés debido a que contienen compuestos bioactivos como polisacáridos, aceites esenciales, proteínas, fibras, pigmentos naturales y compuestos fenólicos, ampliamente utilizados en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética, química y de materiales. Diversas investigaciones recientes coinciden en que la recuperación de estos compuestos representa una alternativa sostenible para reducir la presión sobre los recursos naturales y generar nuevos productos con alto valor comercial (Rawat et al., 2024).

Dentro de esta perspectiva surge el concepto de **biorrefinería**, entendido como un sistema integrado que permite transformar biomasa renovable en una amplia gama de productos químicos, biomateriales, biocombustibles y energía mediante la integración de diferentes procesos de conversión. El principio fundamental de una biorrefinería consiste en maximizar el aprovechamiento de cada fracción de la biomasa, minimizando la generación de residuos y aumentando la eficiencia global del proceso. Este enfoque ha adquirido especial relevancia en el aprovechamiento de residuos provenientes de frutas y hortalizas debido a su elevada disponibilidad y composición química (Teigiserova et al., 2021).

Entre las diferentes estrategias de valorización, la **valorización en cascada** (*cascading valorization*) representa una de las aproximaciones más eficientes para el aprovechamiento de residuos agroindustriales. Este concepto propone recuperar de manera secuencial los diferentes compuestos presentes en una misma materia prima, comenzando por aquellos de mayor valor económico y continuando con otros productos antes de destinar los residuos finales a la generación de energía o compostaje. Este enfoque incrementa significativamente la eficiencia de utilización de los recursos y constituye uno de los principios fundamentales de las biorrefinerías modernas (Teigiserova et al., 2021).

En este contexto, la cáscara de naranja constituye un ejemplo representativo de biomasa con alto potencial de valorización. Además de representar uno de los principales residuos generados por la industria de jugos y derivados cítricos, contiene una elevada concentración de compuestos de interés industrial, entre ellos aceites esenciales, pectinas, flavonoides y compuestos fenólicos. La recuperación integrada de estos componentes permite incrementar considerablemente el valor agregado del residuo y reducir los impactos ambientales asociados a su disposición final,

alineándose con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima) (United Nations, 2015).

En consecuencia, la valorización de residuos agroindustriales mediante procesos integrados representa una estrategia tecnológica que combina sostenibilidad ambiental, eficiencia en el uso de recursos y generación de valor económico. Bajo esta perspectiva, el aprovechamiento secuencial de la cáscara de naranja para la obtención de aceite esencial y pectina constituye una aplicación práctica de los principios de la economía circular y de las biorrefinerías, contribuyendo al desarrollo de procesos industriales más sostenibles y competitivos.

5.2. LA CÁSCARA DE NARANJA COMO MATERIA PRIMA PARA BIORREFINERÍAS

La creciente producción mundial de cítricos ha incrementado significativamente la disponibilidad de residuos agroindustriales susceptibles de ser aprovechados mediante procesos de valorización. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los cítricos constituyen uno de los grupos frutales de mayor producción a nivel mundial, siendo la naranja (*Citrus sinensis*) la especie predominante tanto para consumo fresco como para la elaboración de jugos y productos industrializados (FAO, 2024). Como consecuencia, el procesamiento industrial genera grandes volúmenes de residuos sólidos, conformados principalmente por cáscara, pulpa, semillas y membranas, que representan entre el 45 % y el 60 % del peso total del fruto, dependiendo de la variedad y del proceso tecnológico utilizado (Rawat et al., 2024).

Desde la perspectiva de la bioeconomía circular, la cáscara de naranja ha dejado de ser considerada un residuo para convertirse en una materia prima renovable con elevado potencial para el desarrollo de biorrefinerías. Su composición química evidencia la presencia de numerosos compuestos de interés industrial, entre ellos aceites esenciales, pectinas, celulosa, hemicelulosa, lignina, flavonoides, carotenoides, compuestos fenólicos, azúcares estructurales y fibra dietaria, los cuales pueden recuperarse mediante diferentes tecnologías de extracción y transformación (Ranjha et al., 2022).

La fracción más externa del pericarpio, conocida como **flavedo**, concentra glándulas secretoras que almacenan aceite esencial, cuyo principal componente es el D-limoneno, acompañado por otros monoterpenos y compuestos oxigenados responsables de sus propiedades aromáticas, antioxidantes y antimicrobianas. Por otra parte, el **albedo**, localizado inmediatamente debajo del

flavado, presenta una elevada concentración de sustancias pécticas, constituyendo una de las principales fuentes comerciales de pectina utilizada en la industria alimentaria y farmacéutica (Willats et al., 2006; Grover et al., 2024).

Además de los compuestos mayoritarios, la cáscara de naranja contiene metabolitos secundarios con reconocidas propiedades biológicas, entre ellos hesperidina, naringina, ácido ferúlico, ácido cafeico y diversos compuestos fenólicos que presentan actividad antioxidante y potencial aplicación en alimentos funcionales, nutraceuticos y productos farmacéuticos. La recuperación integral de estos compuestos ha motivado el desarrollo de nuevos esquemas de aprovechamiento basados en el concepto de biorrefinería, donde una misma biomasa puede convertirse en múltiples productos de alto valor agregado mediante procesos secuenciales de extracción (Chandrasekar et al., 2024).

Las investigaciones desarrolladas durante los últimos años muestran que la valorización de la cáscara de naranja ha evolucionado desde procesos convencionales orientados a la obtención de un único producto hacia esquemas integrados que buscan maximizar el aprovechamiento de todas las fracciones del residuo. En este contexto, la recuperación inicial del aceite esencial permite eliminar una fracción importante de compuestos volátiles que podrían interferir en etapas posteriores de procesamiento, mientras que el material residual conserva un elevado contenido de pectinas susceptibles de ser extraídas mediante hidrólisis ácida u otras tecnologías emergentes. Esta secuencia favorece un mejor aprovechamiento de la biomasa y reduce significativamente la generación de residuos finales (Teigiserova et al., 2021).

El concepto de **biorrefinería de residuos cítricos** propone precisamente esta integración de procesos, donde los diferentes componentes de la biomasa son recuperados de forma secuencial de acuerdo con su valor económico y sus características fisicoquímicas. Bajo este enfoque, la obtención de aceite esencial y pectina representa una de las alternativas más viables desde el punto de vista tecnológico, debido a la elevada demanda comercial de ambos productos y a la madurez de las tecnologías de extracción disponibles (Rawat et al., 2024).

Desde el punto de vista industrial, la incorporación de procesos integrados para el aprovechamiento de la cáscara de naranja ofrece múltiples beneficios. Además de reducir los costos asociados al manejo y disposición de residuos, permite diversificar la producción mediante la generación de ingredientes naturales destinados a las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y química. Asimismo, contribuye al cumplimiento de los principios de la economía circular al incrementar la eficiencia en el uso de recursos y disminuir la cantidad de residuos destinados a disposición final (European Commission, 2023).

En consecuencia, la cáscara de naranja reúne las características necesarias para ser considerada una materia prima estratégica dentro de las biorrefinerías agroindustriales, debido a su amplia disponibilidad, su elevado contenido de compuestos de interés comercial y la posibilidad de integrar diferentes operaciones unitarias que permitan maximizar el aprovechamiento de la biomasa. Estas características sustentan el desarrollo del presente trabajo, el cual propone un proceso integrado para la recuperación secuencial de aceite esencial y pectina como una alternativa tecnológica orientada a la valorización sostenible de residuos agroindustriales.

5.3. EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE RESIDUOS CÍTRICOS

El aceite esencial de naranja constituye uno de los productos de mayor valor agregado obtenidos a partir de residuos cítricos debido a su amplia aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética, química y de productos de limpieza. Este aceite está compuesto principalmente por hidrocarburos monoterpénicos, siendo el **D-limoneno** el componente mayoritario, con concentraciones que pueden superar el 90 % de la composición total, acompañado por compuestos minoritarios como β -mirceno, α -pineno, linalool y citral, responsables de sus propiedades aromáticas, antioxidantes y antimicrobianas (Burt, 2004; Rawat et al., 2024).

La composición química del aceite esencial depende de diversos factores, entre ellos la variedad de naranja, el grado de madurez del fruto, las condiciones de cultivo, el almacenamiento de la materia prima y, principalmente, la tecnología de extracción utilizada. Estas variables influyen tanto en el rendimiento del proceso como en la calidad fisicoquímica del aceite obtenido, determinando su posterior aplicación industrial (Ranjha et al., 2022).

En la actualidad existen diversas tecnologías para la recuperación de aceites esenciales a partir de residuos cítricos. Entre los métodos convencionales destacan el prensado en frío, la hidrodestilación y la destilación por arrastre de vapor, mientras que las investigaciones más recientes han incorporado tecnologías emergentes como la extracción asistida por microondas, ultrasonido, fluidos supercríticos y solventes eutécticos profundos. Estas alternativas buscan incrementar el rendimiento de extracción, reducir el consumo energético y preservar los compuestos termolábiles presentes en el aceite esencial (Rawat et al., 2024; Grover et al., 2024).

A pesar del desarrollo de tecnologías avanzadas, la **destilación por arrastre de vapor** continúa siendo uno de los métodos más utilizados a escala industrial debido a su simplicidad operativa, confiabilidad y facilidad de escalamiento. El principio de esta técnica consiste en poner en contacto vapor de agua con el material vegetal, permitiendo la volatilización de los compuestos aromáticos a temperaturas inferiores a sus puntos normales de ebullición. Posteriormente, la

mezcla de vapor y aceite esencial es condensada y separada por diferencia de densidades, obteniéndose un producto con alta pureza sin necesidad de utilizar solventes orgánicos (Azmir et al., 2013).

Diversos estudios han demostrado que la destilación por arrastre de vapor presenta ventajas importantes para el procesamiento de residuos cítricos, entre ellas la obtención de aceites esenciales con características fisicoquímicas estables, bajos costos de operación y una tecnología ampliamente disponible en la industria. Asimismo, el proceso permite conservar la estructura física de la biomasa residual, condición particularmente importante cuando se pretende realizar un aprovechamiento secuencial para la recuperación de otros compuestos, como la pectina, en etapas posteriores del proceso (Teigiserova et al., 2021).

La literatura científica reciente también destaca la importancia de optimizar variables operativas como el tamaño de partícula, la relación sólido-vapor, el tiempo de extracción, la presión y la temperatura del proceso, debido a su influencia directa sobre el rendimiento y la composición química del aceite esencial. La adecuada selección de estos parámetros permite mejorar la eficiencia de extracción y disminuir el consumo energético, favoreciendo la sostenibilidad del proceso industrial (Rawat et al., 2024).

Desde la perspectiva de las biorrefinerías, la recuperación inicial del aceite esencial constituye una etapa estratégica dentro del aprovechamiento integral de la cáscara de naranja. La extracción de los compuestos volátiles antes de la hidrólisis de la biomasa evita pérdidas de componentes aromáticos, facilita el procesamiento posterior y aumenta el valor económico global del residuo agroindustrial. Por ello, la recuperación secuencial del aceite esencial seguida de la extracción de pectina representa una de las configuraciones de proceso más estudiadas para la valorización integral de residuos cítricos (Teigiserova et al., 2021).

En consecuencia, la destilación por arrastre de vapor continúa siendo una alternativa tecnológica adecuada para procesos de valorización de cáscara de naranja, particularmente cuando forma parte de esquemas integrados de biorrefinería orientados a la obtención de múltiples productos de valor agregado. Su madurez tecnológica, facilidad de operación y potencial de escalamiento industrial justifican su selección como método de extracción en la presente investigación.

5.4. OBTENCIÓN DE PECTINA A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA

La pectina es un heteropolisacárido estructural presente en la pared celular primaria y la lámina media de los tejidos vegetales, donde desempeña un papel fundamental en la cohesión celular y

en las propiedades mecánicas de los frutos. Desde el punto de vista industrial, constituye uno de los hidrocoloides naturales de mayor importancia debido a sus propiedades gelificantes, espesantes, estabilizantes y emulsificantes, las cuales han favorecido su amplia utilización en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y biomédica (Willats et al., 2006).

La principal fuente comercial de pectina corresponde a los residuos generados durante el procesamiento de frutas cítricas y manzanas. Entre ellos, la cáscara de naranja representa una de las materias primas más importantes debido a su elevada disponibilidad, alto contenido de sustancias pécticas y facilidad de procesamiento. Diversos estudios reportan que la concentración de pectina en la fracción de albedo puede variar entre el 20 % y el 35 % de la materia seca, dependiendo de factores como la variedad del fruto, las condiciones agronómicas, el grado de madurez y el método de extracción empleado (Ranjha et al., 2022; Rawat et al., 2024).

La creciente demanda de pectina responde no solo a su aplicación tradicional en la elaboración de mermeladas, jaleas y productos de confitería, sino también al desarrollo de nuevas aplicaciones en alimentos funcionales, sistemas de liberación controlada de fármacos, biomateriales, películas biodegradables y envases sostenibles. Estas aplicaciones han impulsado la investigación de tecnologías de extracción más eficientes y ambientalmente responsables, alineadas con los principios de la química verde y la economía circular (Grover et al., 2024).

El método convencional de obtención de pectina consiste en la **extracción mediante hidrólisis ácida**, proceso en el cual el material vegetal es sometido a una solución ácida, generalmente utilizando ácido clorhídrico, nítrico, sulfúrico o cítrico, a temperaturas comprendidas entre 70 °C y 100 °C. Bajo estas condiciones, la protopectina insoluble presente en la pared celular se hidroliza parcialmente y se transforma en pectina soluble, la cual posteriormente es recuperada mediante filtración, concentración y precipitación con alcohol (Canteri-Schemin et al., 2005).

Durante los últimos años, la investigación científica ha desarrollado tecnologías emergentes que buscan mejorar el rendimiento de extracción y disminuir el impacto ambiental del proceso. Entre ellas destacan la extracción asistida por ultrasonido, microondas, calentamiento óhmico, líquidos presurizados y solventes eutécticos profundos (*deep eutectic solvents*), las cuales han demostrado reducir los tiempos de procesamiento, disminuir el consumo energético y mejorar la calidad estructural de la pectina obtenida (Grover et al., 2024; Wang et al., 2023).

No obstante, a pesar de los avances tecnológicos, la **hidrólisis ácida continúa siendo el método predominante en la producción industrial de pectina**, debido a su elevada eficiencia, simplicidad operativa, facilidad de control y disponibilidad tecnológica. Además, este proceso presenta una

alta compatibilidad con esquemas de aprovechamiento integral de residuos cítricos, ya que puede aplicarse directamente sobre la biomasa residual proveniente de la extracción previa de aceite esencial sin afectar significativamente el rendimiento del polisacárido recuperado (Rawat et al., 2024).

La eficiencia del proceso de extracción depende de múltiples variables operativas, entre ellas el tipo de ácido utilizado, el pH del medio, la temperatura, el tiempo de extracción, la relación sólido-líquido y las características fisicoquímicas de la materia prima. Estos factores influyen directamente en el rendimiento, el peso molecular, el grado de esterificación y las propiedades funcionales de la pectina obtenida, determinando su aplicación industrial posterior (Willats et al., 2006; Grover et al., 2024).

Desde la perspectiva de las biorrefinerías, la recuperación de pectina representa una de las etapas de mayor valor agregado dentro del aprovechamiento integral de residuos cítricos. La extracción secuencial de aceite esencial seguida de la obtención de pectina permite incrementar el aprovechamiento de la biomasa y reducir significativamente la cantidad de residuos destinados a disposición final. Asimismo, esta configuración favorece la integración de operaciones unitarias y mejora la rentabilidad del proceso mediante la obtención de múltiples productos comerciales a partir de una única materia prima (Teigiserova et al., 2021).

En consecuencia, la hidrólisis ácida constituye una alternativa tecnológica consolidada para la recuperación de pectina a partir de cáscara de naranja, especialmente cuando forma parte de procesos integrados orientados a la valorización de residuos agroindustriales. Su implementación, combinada con la extracción previa de aceite esencial, representa una estrategia coherente con los principios de la economía circular y las biorrefinerías, al maximizar el aprovechamiento de la biomasa y promover la generación de productos de alto valor agregado.

5.5. INTEGRACIÓN DE PROCESOS Y SIMULACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La transición hacia sistemas productivos sostenibles ha impulsado el desarrollo de procesos integrados que permitan maximizar el aprovechamiento de materias primas renovables y minimizar la generación de residuos. En el contexto de las biorrefinerías, la integración de procesos constituye una estrategia tecnológica orientada a recuperar de manera secuencial diferentes productos de alto valor agregado a partir de una misma biomasa, incrementando la eficiencia global del sistema y favoreciendo la viabilidad económica de los procesos industriales (Cherubini, 2010; Teigiserova et al., 2021).

En los residuos agroindustriales de origen cítrico, la integración de operaciones unitarias permite aprovechar las diferentes fracciones químicas presentes en la biomasa siguiendo una secuencia lógica de extracción. Este enfoque, conocido como **valorización en cascada** (*cascading valorization*), propone recuperar inicialmente los compuestos de mayor valor económico y continuar posteriormente con la extracción de otros componentes antes de destinar la fracción residual a procesos energéticos o de aprovechamiento secundario. De esta manera, se incrementa el rendimiento global del proceso y se reduce significativamente la cantidad de residuos destinados a disposición final (Ranjha et al., 2022).

En el caso específico de la cáscara de naranja, diversos estudios han demostrado que la recuperación inicial del aceite esencial mediante destilación por arrastre de vapor constituye una etapa estratégica, ya que elimina compuestos volátiles que podrían interferir en procesos posteriores y permite conservar la estructura de la biomasa para la extracción de pectina. Posteriormente, la fracción sólida residual mantiene un elevado contenido de polisacáridos estructurales susceptibles de ser recuperados mediante hidrólisis ácida, optimizando el aprovechamiento integral del material vegetal (Rawat et al., 2024).

A pesar de los avances alcanzados en la valorización de residuos cítricos, la literatura científica evidencia que la mayoría de las investigaciones continúa enfocándose en la optimización individual de procesos de extracción. En contraste, son relativamente escasos los estudios que evalúan la integración secuencial de operaciones unitarias desde una perspectiva de diseño de procesos, considerando simultáneamente aspectos experimentales, balances de materia, requerimientos energéticos y potencial de escalamiento industrial (Teigiserova et al., 2021). Esta brecha limita la transferencia de los resultados de laboratorio hacia aplicaciones industriales, donde la integración de operaciones y la optimización del proceso completo son factores determinantes para la viabilidad técnica y económica.

En este contexto, la **simulación de procesos** se ha consolidado como una herramienta fundamental dentro de la ingeniería química y de procesos, debido a su capacidad para representar el comportamiento de sistemas industriales antes de su implementación física. Mediante modelos matemáticos basados en balances de materia y energía, propiedades termodinámicas y ecuaciones de transporte, la simulación permite evaluar diferentes configuraciones de proceso, optimizar condiciones operativas y estimar el desempeño técnico de una planta a distintas escalas de producción (Towler & Sinnott, 2022).

Entre las plataformas de simulación más utilizadas en la industria química destaca **Aspen Plus**, software ampliamente empleado para el diseño, análisis y optimización de procesos industriales.

Su aplicación permite desarrollar diagramas de flujo, modelar operaciones unitarias, realizar balances de materia y energía, estimar consumos de servicios auxiliares y analizar alternativas de integración de procesos. En investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de biomasa y residuos agroindustriales, Aspen Plus ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar la factibilidad técnica de biorrefinerías, reducir costos de desarrollo y facilitar el escalamiento desde laboratorio hasta planta piloto o industrial (Aspen Technology, 2023; Towler & Sinnott, 2022).

La incorporación de herramientas de simulación dentro del diseño de procesos responde además a los principios de la **Ingeniería de Procesos Sostenibles**, disciplina que busca optimizar simultáneamente el desempeño técnico, económico y ambiental de los sistemas industriales. Bajo este enfoque, la simulación facilita la identificación de oportunidades de mejora, la reducción del consumo de materias primas y energía, así como la evaluación de diferentes escenarios operativos sin necesidad de realizar modificaciones físicas en la planta, disminuyendo costos y riesgos asociados al desarrollo tecnológico (Towler & Sinnott, 2022).

Desde la perspectiva de la economía circular, la integración de procesos y la simulación constituyen herramientas complementarias para el desarrollo de biorrefinerías agroindustriales. Mientras la integración permite maximizar la recuperación de productos de valor agregado a partir de una misma materia prima, la simulación proporciona información técnica para optimizar el proceso y evaluar su potencial de implementación industrial. La combinación de ambas estrategias contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de recursos, reducir la generación de residuos y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos (European Commission, 2023).

En este contexto, la presente investigación propone un proceso integrado para la valorización de la cáscara de naranja mediante la extracción secuencial de aceite esencial y pectina, complementado con la simulación del proceso en Aspen Plus. Esta aproximación permite no solo validar experimentalmente la recuperación de ambos productos, sino también analizar el comportamiento del proceso a escala industrial mediante herramientas de ingeniería, constituyendo un aporte técnico orientado al desarrollo de alternativas sostenibles para el aprovechamiento integral de residuos agroindustriales.

6. METODOLOGÍA

6.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación corresponde a un estudio de enfoque **cuantitativo**, de tipo **aplicado** y con alcance **experimental**, orientado al diseño y evaluación de un proceso integrado para la

valorización de la cáscara de naranja mediante la obtención secuencial de aceite esencial y pectina. El estudio combinó experimentación a escala de laboratorio con simulación de procesos utilizando el software Aspen Plus®, con el propósito de analizar la factibilidad técnica del proceso y su potencial de escalamiento industrial.

La metodología se desarrolló en dos fases complementarias. La primera consistió en la ejecución de ensayos experimentales para la extracción de aceite esencial mediante destilación por arrastre de vapor y la posterior obtención de pectina mediante hidrólisis ácida, empleando como materia prima cáscara de naranja fresca. Durante esta etapa se determinaron los principales parámetros operativos y los rendimientos experimentales de cada proceso.

La segunda fase comprendió el modelado y simulación del proceso integrado mediante Aspen Plus® V11.1. Para ello se elaboró el diagrama de flujo del proceso, se definieron las operaciones unitarias involucradas y se realizaron los balances de materia correspondientes, tomando como base los resultados experimentales obtenidos en laboratorio. Posteriormente, el modelo fue escalado para evaluar el comportamiento del proceso bajo una capacidad nominal de procesamiento de una tonelada de cáscara de naranja.

La integración de la experimentación con la simulación permitió comparar los rendimientos experimentales con los resultados obtenidos mediante el modelo computacional, evaluando la consistencia del proceso y su potencial aplicación a escala industrial.

6.2. MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en la investigación fue cáscara fresca de naranja (*Citrus sinensis*), obtenida a partir de frutos destinados al consumo y procesamiento. Previamente a su utilización, las naranjas fueron seleccionadas considerando criterios de integridad física, ausencia de daños mecánicos y deterioro microbiológico, con el propósito de reducir la variabilidad asociada a la calidad de la materia prima.

Posteriormente, los frutos fueron sometidos a un proceso de lavado con agua potable para eliminar impurezas superficiales y contaminantes. Una vez limpios, se realizó el pelado manual, separando la cáscara del resto del fruto. La materia prima obtenida fue pesada y utilizada inmediatamente en los ensayos experimentales para minimizar pérdidas de compuestos volátiles y modificaciones en su composición fisicoquímica.

Cada ensayo experimental se desarrolló utilizando **1 kg de cáscara fresca**, cantidad seleccionada para garantizar condiciones homogéneas durante las etapas de extracción de aceite esencial y

obtención de pectina. La biomasa residual obtenida después de la destilación fue empleada directamente como materia prima para la extracción de pectina, manteniendo el enfoque de aprovechamiento secuencial propuesto en la investigación.

La selección de la cáscara de naranja como materia prima responde a su elevado contenido de aceite esencial, localizado principalmente en el flavedo, y de sustancias pécticas presentes en el albedo, características que la convierten en uno de los residuos agroindustriales con mayor potencial para procesos de valorización bajo un enfoque de economía circular (Rawat et al., 2024; Ranjha et al., 2022).

Tabla 1.
Características de la materia prima empleada en la investigación

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Materia prima	Cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i>)
Estado	Fresca
Cantidad por ensayo	1 kg
Preparación	Lavado, pelado y separación manual
Destino inicial	Extracción de aceite esencial
Destino posterior	Extracción de pectina

Fuente: Elaboración propia.

6.3. EXTRACCIÓN EXPERIMENTAL DEL ACEITE ESENCIAL

La obtención del aceite esencial se realizó mediante **destilación por arrastre de vapor**, técnica ampliamente utilizada para la recuperación de compuestos volátiles presentes en materiales vegetales debido a su simplicidad operativa, facilidad de escalamiento y conservación de las propiedades fisicoquímicas del producto obtenido (Azmir et al., 2013).

El sistema experimental estuvo constituido por un generador de vapor, un extractor, un condensador y un recipiente separador para la recuperación del aceite esencial. La cáscara fresca fue colocada en el extractor, permitiendo el paso continuo del vapor a través del material vegetal. Durante el proceso, los compuestos aromáticos fueron volatilizados conjuntamente con el vapor

de agua y posteriormente condensados para obtener una mezcla líquida compuesta por agua y aceite esencial.

La separación del aceite esencial se realizó mediante decantación aprovechando la diferencia de densidad entre ambas fases. Posteriormente, el aceite recuperado fue almacenado en recipientes de vidrio color ámbar, protegidos de la luz y a temperatura ambiente hasta la realización de las mediciones correspondientes.

El rendimiento experimental del proceso fue determinado mediante la relación entre la masa de aceite esencial obtenida y la masa inicial de cáscara fresca utilizada en cada ensayo, expresándose como porcentaje (%).

La biomasa residual generada después de la extracción del aceite esencial fue recuperada íntegramente y utilizada como materia prima para la siguiente etapa del proceso, correspondiente a la extracción de pectina, con el objetivo de evaluar el aprovechamiento secuencial de la cáscara de naranja.

Tabla 2.
Principales condiciones experimentales para la extracción de aceite esencial

PARÁMETRO	CONDICIÓN
Método de extracción	Destilación por arrastre de vapor
Materia prima	Cáscara fresca de naranja
Cantidad por ensayo	1 kg
Producto obtenido	Aceite esencial
Biomasa residual	Destinada a extracción de pectina

Fuente: Elaboración propia.

6.4. EXTRACCIÓN EXPERIMENTAL DE PECTINA

La obtención de pectina se realizó utilizando la biomasa residual generada después de la extracción del aceite esencial, con el propósito de evaluar el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja dentro de un esquema de valorización secuencial. Esta etapa permitió recuperar las sustancias pécticas presentes principalmente en el albedo, maximizando el valor agregado del residuo agroindustrial.

El procedimiento experimental se desarrolló mediante **hidrólisis ácida**, técnica ampliamente utilizada para la extracción industrial de pectina debido a su alta eficiencia y facilidad de implementación. La biomasa residual fue sometida a un proceso de calentamiento en medio ácido bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y pH, favoreciendo la solubilización de la protopectina presente en la pared celular vegetal.

Una vez concluida la etapa de extracción, la suspensión obtenida fue filtrada para separar el extracto líquido del material sólido residual. Posteriormente, la solución rica en pectina fue sometida a un proceso de precipitación mediante la adición de etanol, promoviendo la separación del polisacárido. El precipitado obtenido fue lavado para eliminar impurezas y posteriormente secado hasta alcanzar masa constante.

Finalmente, la pectina seca fue pesada para determinar el rendimiento experimental del proceso, calculado como la relación entre la masa de pectina recuperada y la masa inicial de cáscara fresca procesada. Este parámetro fue utilizado posteriormente para la validación del modelo desarrollado en Aspen Plus®.

Tabla 3
Condiciones generales para la extracción experimental de pectina

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Método de extracción	Hidrólisis ácida
Materia prima	Biomasa residual después de la extracción de aceite esencial
Separación sólido-líquido	Filtración
Recuperación de pectina	Precipitación con etanol
Acondicionamiento final	Lavado y secado
Variable de evaluación	Rendimiento de pectina (%)

Fuente: Elaboración propia.

6.5. SIMULACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE ASPEN PLUS®

Con el propósito de evaluar la factibilidad técnica del proceso integrado y analizar su potencial de escalamiento industrial, se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software **Aspen Plus® versión 11.1**. El modelo fue construido a partir del diagrama de flujo del proceso diseñado experimentalmente, incorporando las principales operaciones unitarias involucradas en la obtención secuencial de aceite esencial y pectina.

La simulación comprendió la representación de las etapas de alimentación de materia prima, extracción de aceite esencial, separación de corrientes, extracción de pectina y recuperación de

productos finales. Para cada operación unitaria se definieron las corrientes de entrada y salida, las condiciones de operación y las propiedades fisicoquímicas requeridas para efectuar los balances de materia.

Los datos experimentales obtenidos en laboratorio fueron utilizados como parámetros de referencia para ajustar el modelo y verificar la consistencia de los resultados de simulación. Posteriormente, el modelo fue utilizado para estimar el comportamiento del proceso a una capacidad de producción superior, evaluando la distribución de flujos de materia y la recuperación de los productos obtenidos.

La simulación permitió además identificar los principales requerimientos del proceso y generar una base técnica para el análisis de escalamiento industrial, reduciendo la necesidad de realizar pruebas experimentales adicionales y facilitando la evaluación de diferentes escenarios operativos.

Tabla 4.
Componentes principales del modelo de simulación

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Software	Aspen Plus® V11.1
Tipo de simulación	Estado estacionario
Base del modelo	Resultados experimentales
Variables analizadas	Flujos de materia, recuperación de productos y balances de masa
Objetivo	Evaluar la factibilidad técnica del proceso integrado

Fuente: Elaboración propia.

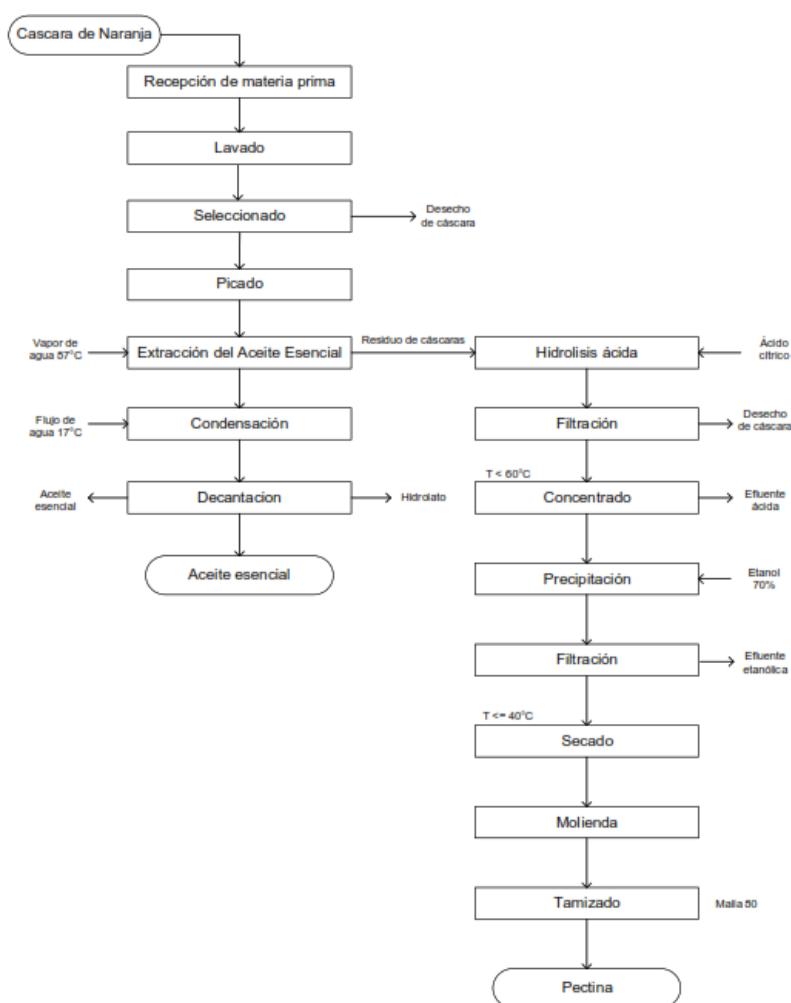
6.6. EVALUACIÓN DEL PROCESO INTEGRADO

La evaluación del proceso integrado se realizó mediante el análisis conjunto de los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación, considerando el desempeño de cada etapa de extracción y la eficiencia global del sistema propuesto.

Como indicadores de evaluación se emplearon el rendimiento de aceite esencial, el rendimiento de pectina y la recuperación global de productos de valor agregado obtenidos a partir de la cáscara de naranja. Asimismo, se verificó la consistencia entre los balances de materia experimentales y los resultados generados por el modelo de Aspen Plus®, con el fin de validar su aplicabilidad para estudios de escalamiento.

Finalmente, se analizó el proceso desde la perspectiva de la valorización de residuos agroindustriales, identificando las ventajas de integrar la extracción secuencial de aceite esencial y pectina frente al aprovechamiento convencional de la biomasa. Este análisis permitió establecer el potencial del proceso como una alternativa tecnológica alineada con los principios de la economía circular y las biorrefinerías.

Figura 1.
Proceso integrado



Fuente: Elaboración propia.

7. RESULTADOS

7.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La primera etapa de la investigación consistió en la caracterización de la materia prima empleada para el proceso de valorización. Se utilizó naranja dulce (*Citrus sinensis*), seleccionada por su disponibilidad y por ser una de las principales especies cítricas procesadas para la obtención de jugos y otros derivados. La caracterización permitió determinar la distribución porcentual de las diferentes fracciones del fruto y evaluar el potencial de aprovechamiento de la cáscara como materia prima para la recuperación de compuestos de valor agregado.

Los resultados experimentales evidenciaron que la cáscara representó aproximadamente el 19,35 % del peso total del fruto, mientras que el conjunto de residuos generados durante el procesamiento alcanzó aproximadamente el 50,22 %, incluyendo cáscara, pulpa residual y semillas. Estos valores demuestran que una proporción importante de la biomasa generada durante el procesamiento de la naranja permanece disponible para procesos de valorización, constituyendo una fuente renovable para la obtención de productos de interés industrial.

Los porcentajes obtenidos son consistentes con lo reportado por la literatura científica. Rawat et al. (2024) indican que entre el 45 % y el 60 % del peso de los frutos cítricos corresponde a subproductos generados durante el procesamiento industrial, mientras que Ranjha et al. (2022) señalan que la cáscara constituye la fracción de mayor interés debido a su elevado contenido de aceite esencial, pectina y compuestos fenólicos. La ligera diferencia observada respecto a algunos estudios puede atribuirse a factores como la variedad de la naranja, las condiciones de cultivo, el estado de madurez del fruto y el método de procesamiento empleado.

Desde la perspectiva de la economía circular, estos resultados evidencian que la mayor parte de la biomasa generada durante el procesamiento de cítricos no debe considerarse un residuo, sino una materia prima secundaria con alto potencial de valorización. La recuperación secuencial de compuestos de alto valor, como el aceite esencial y la pectina, permite transformar un subproducto agrícola en insumos para las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y química, incrementando la eficiencia en el uso de los recursos y reduciendo la generación de residuos.

Asimismo, la caracterización realizada permitió establecer la base para el diseño experimental y para el desarrollo del modelo de simulación, ya que la composición de la materia prima constituye el punto de partida para los balances de materia del proceso integrado. En este sentido, la

disponibilidad de una fracción significativa de cáscara respalda la viabilidad técnica del esquema de aprovechamiento propuesto y justifica su evaluación mediante herramientas de simulación orientadas al escalamiento industrial.

Tabla 5.
Distribución de las fracciones de la naranja utilizadas en el estudio

FRACCIÓN	PARTICIPACIÓN (%)	POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO
Cáscara	19,35	Obtención de aceite esencial y pectina
Residuos totales del procesamiento	50,22	Valorización integral de biomasa
Pulpa para consumo	Complemento del fruto	Producción de jugos y derivados

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales del proyecto.

Discusión

La caracterización de la materia prima constituye un aspecto determinante para el diseño de procesos de valorización, debido a que el rendimiento global depende directamente de la disponibilidad de biomasa aprovechable. En este estudio, el porcentaje de residuos obtenido confirma que la industria citrícola genera cantidades suficientes de materia prima para implementar esquemas de biorrefinería, coincidiendo con las tendencias descritas por Rawat et al. (2024) y Teigiserova et al. (2021). Además, la elevada proporción de cáscara disponible respalda la selección de esta biomasa como fuente para la obtención secuencial de aceite esencial y pectina, alineándose con los principios de la economía circular desarrollados en el marco teórico.

7.2. RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL

La primera etapa del proceso integrado consistió en la recuperación del aceite esencial contenido en la cáscara de naranja mediante destilación por arrastre de vapor. Durante el desarrollo experimental se realizaron ajustes en las condiciones de operación con el propósito de optimizar el rendimiento de extracción y mejorar la eficiencia del sistema. Entre las principales modificaciones implementadas se encuentran la reducción del tamaño del material vegetal hasta un factor de empaque aproximado de **2 × 2 cm**, así como la incorporación de un sistema de recirculación del hidrolato, lo que permitió disminuir el consumo de agua sin afectar la calidad del producto

obtenido. Estas mejoras incrementaron la estabilidad del proceso y optimizaron el aprovechamiento de la materia prima.

La reducción del tamaño de partícula favoreció una mayor exposición de las glándulas oleíferas presentes en el flavedo, facilitando la liberación de los compuestos volátiles durante el contacto con el vapor. Este comportamiento coincide con lo reportado por Azmir et al. (2013), quienes indican que la disminución del tamaño del material vegetal mejora la transferencia de masa y aumenta la eficiencia de extracción de metabolitos secundarios. De igual manera, la recirculación del hidrolato representa una estrategia de optimización compatible con los principios de producción más limpia, al reducir el consumo de recursos sin modificar significativamente el desempeño del proceso.

El rendimiento experimental obtenido confirmó la viabilidad técnica de la destilación por arrastre de vapor como método para la recuperación de aceite esencial a partir de cáscara de naranja. Los resultados experimentales obtenidos sirvieron posteriormente como base para la simulación del proceso en Aspen Plus®, permitiendo validar el modelo de balances de materia desarrollado para el escalamiento industrial. La concordancia entre los datos experimentales y los valores obtenidos mediante simulación demuestra que el modelo representa adecuadamente el comportamiento del sistema de extracción.

Además del rendimiento de extracción, se evaluaron las principales propiedades fisicoquímicas del aceite esencial obtenido, debido a que estos parámetros constituyen indicadores de calidad ampliamente utilizados en la industria. Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.
Propiedades fisicoquímicas del aceite esencial obtenido

PARÁMETRO	RESULTADO EXPERIMENTAL	VALOR DE REFERENCIA
Densidad (g/cm ³)	0,8499	0,840–0,860
Índice de refracción	1,4735	1,470–1,475
pH	4,3	Característico del aceite esencial

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales del proyecto.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados para aceites esenciales de Citrus sinensis, lo que indica que el proceso de extracción permitió conservar las características fisicoquímicas del producto. La densidad y el índice de refracción son parámetros estrechamente relacionados con la composición química del aceite esencial y, particularmente, con el contenido

de D-limoneno, compuesto mayoritario en los aceites de naranja. Valores similares han sido reportados por Rawat et al. (2024) y Ranjha et al. (2022), quienes señalan que estas propiedades constituyen indicadores indirectos de la pureza del aceite y de la eficiencia del proceso de extracción.

Con el propósito de evaluar la inocuidad del producto obtenido, también se realizaron análisis microbiológicos. Los resultados evidenciaron ausencia de crecimiento de bacterias aerobias mesófilas, mohos, levaduras y coliformes, demostrando que el proceso de extracción y las condiciones de manipulación permitieron obtener un producto microbiológicamente seguro para aplicaciones industriales.

Desde el punto de vista tecnológico, estos resultados son particularmente relevantes, ya que confirman que la destilación por arrastre de vapor no solo permitió recuperar el aceite esencial, sino también preservar sus características de calidad. La ausencia de contaminación microbiológica constituye un requisito fundamental para su utilización en industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas, donde los estándares de calidad e inocuidad son especialmente exigentes.

La combinación de un rendimiento satisfactorio, propiedades fisicoquímicas dentro de los rangos de referencia y resultados microbiológicos favorables demuestra que la primera etapa del proceso integrado alcanzó los objetivos planteados. Asimismo, el hecho de que la biomasa residual mantuviera sus características estructurales permitió su utilización posterior para la extracción de pectina, aspecto que constituye uno de los principales aportes del enfoque de valorización secuencial desarrollado en esta investigación.

Discusión

La literatura reciente señala que la eficiencia en la extracción de aceites esenciales depende de múltiples variables, entre ellas el tamaño de partícula, el tiempo de extracción, la presión del vapor y las características de la materia prima (Teigiserova et al., 2021; Rawat et al., 2024). En este estudio, la optimización del factor de empaque y la recirculación del hidrolato contribuyeron a mejorar el desempeño del sistema sin requerir modificaciones complejas en el equipo de extracción. Esta estrategia representa una alternativa técnicamente viable para pequeñas y medianas agroindustrias, especialmente en contextos donde la disponibilidad de recursos es limitada.

Adicionalmente, la obtención de un aceite esencial con propiedades fisicoquímicas acordes con los estándares reportados en la literatura respalda la efectividad de la destilación por arrastre de vapor como una tecnología madura y confiable para el aprovechamiento de residuos cítricos. Más allá de la recuperación del producto, el mayor aporte del proceso radica en que la extracción inicial del aceite esencial no comprometió la posterior recuperación de pectina, sino que facilitó el aprovechamiento secuencial de la biomasa dentro de un esquema de biorrefinería. Este resultado fortalece la propuesta de integración de procesos planteada en la investigación y demuestra el potencial de la cáscara de naranja como materia prima para sistemas de producción alineados con los principios de la economía circular.

7.3. RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE PECTINA

Una vez concluida la extracción del aceite esencial, la biomasa residual fue utilizada para la recuperación de pectina mediante hidrólisis ácida, con el objetivo de evaluar el potencial de aprovechamiento integral de la cáscara de naranja. Esta estrategia permitió dar continuidad al proceso de valorización de la biomasa, evitando que el residuo generado en la primera etapa fuese descartado y favoreciendo la obtención de un segundo producto de interés industrial.

Los resultados experimentales demostraron que la biomasa residual conservó una cantidad significativa de sustancias pécticas susceptibles de ser extraídas, confirmando que la recuperación previa del aceite esencial no afectó de manera significativa la disponibilidad de este polisacárido estructural. Este comportamiento respalda el concepto de valorización en cascada, en el cual una misma materia prima puede emplearse para la obtención secuencial de diferentes productos de alto valor agregado (Teigiserova et al., 2021).

El rendimiento experimental obtenido fue utilizado posteriormente para la validación del modelo desarrollado en Aspen Plus®, evidenciando una adecuada correspondencia entre los resultados experimentales y los valores estimados mediante simulación. Para una base de cálculo de **1 kg de cáscara fresca**, el proceso permitió recuperar aproximadamente **35 g de pectina**, resultado que demuestra la viabilidad técnica de la segunda etapa del proceso integrado.

Con el propósito de evaluar la calidad del producto obtenido, se realizaron análisis fisicoquímicos de la pectina extraída. Entre los parámetros evaluados destacan el contenido de humedad y el grado de esterificación, debido a su influencia sobre las propiedades funcionales y aplicaciones industriales del producto. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.
Propiedades fisicoquímicas de la pectina obtenida

PARÁMETRO	RESULTADO EXPERIMENTAL	VALOR DE REFERENCIA
Humedad (%)	5,6	< 12 %
Grado de esterificación (%)	72,43	> 50 % (Pectina de alto metoxilo)

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales del proyecto.

El contenido de humedad obtenido se encuentra por debajo de los límites generalmente aceptados para pectinas comerciales, lo que favorece su estabilidad durante el almacenamiento y reduce el riesgo de deterioro microbiológico. Por otra parte, el grado de esterificación obtenido (72,43 %) permite clasificar la pectina como **pectina de alto metoxilo (High Methoxyl Pectin, HMP)**, característica que la hace especialmente adecuada para aplicaciones en la industria alimentaria, particularmente en la elaboración de mermeladas, jaleas, productos de confitería y bebidas, donde se requieren elevadas capacidades gelificantes (Willats et al., 2006).

La obtención de una pectina con estas características representa un resultado relevante desde el punto de vista industrial, ya que las pectinas de alto metoxilo poseen mayor demanda comercial y constituyen el tipo de pectina predominante en el mercado internacional. Asimismo, el grado de esterificación alcanzado evidencia que las condiciones de hidrólisis empleadas permitieron preservar la estructura química del polisacárido, evitando una degradación excesiva durante el proceso de extracción.

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones recientes sobre valorización de residuos cítricos. Grover et al. (2024) reportan que la hidrólisis ácida continúa siendo una de las tecnologías más eficientes para la recuperación de pectina a partir de cáscaras de naranja, permitiendo obtener productos con propiedades funcionales comparables a las pectinas comerciales cuando las variables de extracción son adecuadamente controladas. De manera similar, Rawat et al. (2024) destacan que el aprovechamiento de residuos cítricos mediante procesos integrados constituye una estrategia prometedora para incrementar el valor económico de la biomasa y reducir la generación de residuos.

Desde la perspectiva de la economía circular, la recuperación de pectina después de la extracción del aceite esencial permitió incrementar significativamente el aprovechamiento de la materia prima. En lugar de destinar la biomasa residual a disposición final, el proceso desarrollado posibilitó la obtención de un segundo producto de alto valor agregado, mejorando la eficiencia global del sistema y fortaleciendo el enfoque de biorrefinería propuesto en esta investigación.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la extracción secuencial constituye una alternativa técnicamente viable para la valorización integral de la cáscara de naranja. Mientras que numerosos estudios se concentran en la recuperación de un único compuesto de interés, el proceso desarrollado en esta investigación permitió obtener dos productos comerciales utilizando la misma materia prima, incrementando el rendimiento global del aprovechamiento.

La obtención de una pectina de **alto metoxilo**, con un grado de esterificación superior al 70 %, evidencia que la etapa previa de destilación por arrastre de vapor no comprometió la calidad del polisacárido recuperado. Este resultado representa un aspecto diferenciador de la investigación, ya que demuestra la compatibilidad entre ambas operaciones unitarias dentro de un esquema de producción integrada. Además, la validación experimental del proceso proporciona información relevante para futuras aplicaciones industriales orientadas al aprovechamiento sostenible de residuos agroalimentarios.

La literatura reciente coincide en señalar que las biorrefinerías basadas en residuos cítricos deben orientarse hacia la recuperación secuencial de múltiples compuestos de interés para maximizar el valor económico de la biomasa (Ranjha et al., 2022; Rawat et al., 2024). En este sentido, los resultados obtenidos respaldan esta tendencia y muestran que la combinación de destilación por arrastre de vapor e hidrólisis ácida constituye una estrategia eficaz para incrementar la eficiencia del proceso y reducir la generación de residuos.

7.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO INTEGRADO MEDIANTE ASPEN PLUS®

Con el propósito de evaluar el comportamiento del proceso a una escala superior a la experimental, se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software **Aspen Plus® versión 11.1**, tomando como referencia las condiciones operativas y los rendimientos obtenidos durante los ensayos de laboratorio. El modelo permitió representar las principales operaciones unitarias involucradas en la valorización de la cáscara de naranja, integrando las etapas de extracción de aceite esencial y obtención de pectina dentro de un único diagrama de flujo.

La simulación fue desarrollada bajo condiciones de estado estacionario y se fundamentó en balances de materia para cada una de las corrientes del proceso. Como base de cálculo se utilizó **1 kg/h de cáscara de naranja fresca**, estableciendo las corrientes de alimentación, productos y

residuos conforme al procedimiento experimental desarrollado durante la investigación. Esta metodología permitió validar el modelo mediante la comparación de los resultados simulados con los obtenidos experimentalmente.

El diagrama de flujo generado en Aspen Plus® integró las operaciones de alimentación de materia prima, extracción de aceite esencial mediante destilación, separación de fases, extracción de pectina por hidrólisis ácida y recuperación de productos finales. Esta representación permitió visualizar de manera integral la secuencia de operaciones y cuantificar los flujos de materia asociados a cada etapa del proceso.

Los resultados obtenidos mediante simulación mostraron una adecuada correspondencia con los valores experimentales. Para la base de cálculo establecida, el modelo estimó una producción aproximada de **11,14 mL de aceite esencial** y **35 g de pectina** por kilogramo de cáscara fresca procesada, valores que presentan una diferencia mínima respecto a los resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

Tabla 8.
Comparación entre resultados experimentales y simulados

VARIABLE	EXPERIMENTAL	SIMULACIÓN ASPEN PLUS®	OBSERVACIÓN
Aceite esencial	Resultado experimental	11,14 mL/kg	Alta concordancia
Pectina	Resultado experimental	35 g/kg	Alta concordancia
Balance de materia	Conservado	Conservado	Modelo validado

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales y la simulación desarrollada en Aspen Plus®.

La elevada concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación demuestra que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del proceso integrado. Esta consistencia confirma que los balances de materia implementados representan correctamente las operaciones unitarias consideradas y proporcionan una base confiable para el análisis de escenarios de escalamiento industrial.

Un aspecto relevante del modelo desarrollado es que permitió analizar el proceso completo como un sistema integrado y no como operaciones independientes. En este sentido, la simulación facilitó la cuantificación de las corrientes de entrada y salida, la identificación de los puntos de recuperación de productos y la estimación del aprovechamiento global de la biomasa. Este enfoque resulta especialmente importante para procesos de biorrefinería, donde la interacción entre las diferentes etapas condiciona el desempeño global del sistema (Towler & Sinnott, 2022).

Asimismo, el uso de Aspen Plus® permitió establecer una plataforma para futuras evaluaciones técnico-económicas y energéticas del proceso. Aunque el presente estudio se centró en los balances de materia, el modelo desarrollado puede ampliarse para incorporar balances de energía, análisis de integración térmica, estimación de costos operativos y simulaciones a diferentes capacidades de producción, aspectos fundamentales para la transferencia del proceso hacia aplicaciones industriales (Aspen Technology, 2023).

Discusión

La simulación de procesos constituye una herramienta ampliamente utilizada en ingeniería química para reducir la incertidumbre asociada al escalamiento industrial. Diversos autores destacan que la combinación de experimentación y modelado computacional permite disminuir costos de desarrollo, optimizar condiciones operativas y evaluar el comportamiento de un proceso antes de su implementación física (Towler & Sinnott, 2022).

En esta investigación, la simulación mediante Aspen Plus® permitió validar la viabilidad técnica del proceso integrado de valorización de la cáscara de naranja y demostrar que los resultados experimentales pueden reproducirse mediante un modelo basado en principios de ingeniería de procesos. Esta capacidad de predicción constituye uno de los principales aportes del estudio, ya que facilita el diseño de futuras plantas piloto e industriales orientadas al aprovechamiento de residuos cítricos.

La literatura reciente sobre valorización de residuos agroindustriales señala que una de las principales limitaciones para la transferencia tecnológica radica en la escasa incorporación de herramientas de simulación durante las etapas iniciales del desarrollo de procesos (Rawat et al., 2024). En este contexto, la presente investigación contribuye a reducir dicha brecha al integrar la validación experimental con el modelado computacional, proporcionando una metodología que puede ser replicada en otros procesos de biorrefinería basados en biomasa residual.

Desde la perspectiva de la economía circular, la simulación permitió demostrar que la integración secuencial de operaciones favorece un mayor aprovechamiento de la materia prima y constituye una alternativa técnicamente viable para incrementar la eficiencia de los sistemas productivos. En consecuencia, el modelo desarrollado representa una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones en el diseño de procesos sostenibles orientados a la valorización de residuos agroindustriales.

7.5. EVALUACIÓN INTEGRAL DEL PROCESO Y APORTES AL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La integración de las etapas de extracción de aceite esencial y obtención de pectina permitió desarrollar un esquema de aprovechamiento secuencial de la cáscara de naranja, demostrando que una misma materia prima puede generar múltiples productos de valor agregado mediante la combinación de operaciones unitarias compatibles. Los resultados experimentales y la simulación desarrollada en Aspen Plus® evidenciaron que la recuperación inicial del aceite esencial no afectó significativamente la disponibilidad de sustancias pécticas presentes en la biomasa residual, permitiendo obtener posteriormente una pectina con propiedades fisicoquímicas adecuadas para aplicaciones industriales.

Desde la perspectiva del aprovechamiento de recursos, el proceso integrado incrementó la eficiencia de utilización de la biomasa al transformar un residuo agroindustrial en una fuente de materias primas para diferentes sectores productivos. A diferencia de los esquemas tradicionales, en los cuales la cáscara de naranja suele destinarse a alimentación animal, compostaje o disposición final, la estrategia propuesta permitió recuperar dos productos con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y química, ampliando significativamente el potencial económico del residuo (Rawat et al., 2024; Ranjha et al., 2022).

Uno de los principales resultados del estudio fue la validación del modelo de simulación mediante la comparación entre los datos experimentales y los obtenidos en Aspen Plus®. La elevada concordancia observada confirmó la consistencia de los balances de materia y demostró que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del proceso integrado. Este aspecto resulta particularmente relevante desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, ya que proporciona una herramienta para analizar escenarios de operación, evaluar capacidades de producción y facilitar el escalamiento hacia aplicaciones piloto o industriales (Towler & Sinnott, 2022).

La combinación de experimentación y simulación representa una ventaja metodológica frente a numerosos estudios sobre valorización de residuos cítricos, los cuales se concentran exclusivamente en la optimización de una etapa de extracción. En la presente investigación, la simulación permitió integrar las operaciones unitarias dentro de un único modelo de proceso, proporcionando una visión sistémica del aprovechamiento de la biomasa y sentando las bases para futuras evaluaciones de consumo energético, costos operativos e impacto ambiental.

Los resultados obtenidos también muestran una estrecha relación con los principios de la economía circular y el concepto de biorrefinería. La recuperación secuencial de aceite esencial y pectina incrementa el valor agregado de la materia prima, reduce la generación de residuos y promueve un uso más eficiente de los recursos naturales. En este sentido, el proceso desarrollado contribuye a sustituir modelos lineales de producción por esquemas donde los residuos se incorporan nuevamente como insumos para la generación de nuevos productos, favoreciendo la sostenibilidad de los sistemas agroindustriales (European Commission, 2023).

Desde el punto de vista industrial, la estrategia propuesta presenta ventajas adicionales. La utilización de tecnologías convencionales, como la destilación por arrastre de vapor y la hidrólisis ácida, facilita la adopción del proceso por parte de pequeñas y medianas empresas, al no requerir equipos altamente especializados. Asimismo, la incorporación de herramientas de simulación durante la etapa de diseño permite reducir la incertidumbre asociada al escalamiento, optimizar el dimensionamiento de equipos y disminuir los costos derivados de pruebas experimentales a gran escala (Aspen Technology, 2023).

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse en futuras investigaciones. El modelo desarrollado se centró principalmente en los balances de materia y en la validación de los rendimientos experimentales, por lo que aún es necesario complementar el análisis con balances de energía, evaluación económica, análisis de ciclo de vida y estudios de sensibilidad que permitan cuantificar el desempeño integral del proceso bajo diferentes escenarios de operación. De igual manera, resulta conveniente evaluar otras variedades de cítricos y diferentes condiciones de extracción para ampliar la aplicabilidad del modelo propuesto.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la integración de procesos constituye una estrategia técnicamente viable para la valorización de residuos cítricos y que la combinación de experimentación con simulación de procesos ofrece una metodología robusta para el diseño de sistemas de aprovechamiento sostenible de biomasa residual. Esta aproximación no solo incrementa la recuperación de productos de valor agregado, sino que también proporciona una base técnica para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de biorrefinerías agroindustriales.

7.6. DISCUSIÓN INTEGRADORA

Los hallazgos de esta investigación permiten identificar un aporte que trasciende la obtención de aceite esencial o pectina de manera individual. El principal resultado radica en demostrar que ambas etapas pueden integrarse dentro de un mismo esquema de proceso, manteniendo la

calidad de los productos obtenidos y validando su comportamiento mediante herramientas de simulación. Esta integración constituye un avance respecto a los enfoques tradicionales reportados en la literatura, donde la recuperación de estos compuestos suele analizarse por separado.

La metodología desarrollada también evidencia el valor de incorporar herramientas de ingeniería de procesos en investigaciones orientadas al aprovechamiento de residuos agroindustriales. Mientras la experimentación proporciona evidencia sobre la factibilidad técnica de las operaciones unitarias, la simulación permite evaluar el comportamiento del proceso a escalas superiores y constituye un soporte para la toma de decisiones durante el diseño de plantas industriales. En consecuencia, la combinación de ambas aproximaciones fortalece la transferencia del conocimiento desde el laboratorio hacia aplicaciones productivas.

Finalmente, la investigación demuestra que la valorización integral de la cáscara de naranja puede contribuir simultáneamente a la reducción de residuos, a la generación de productos de alto valor agregado y al fortalecimiento de modelos productivos sostenibles. Estos resultados respaldan la aplicación de estrategias de economía circular en la agroindustria y ponen de manifiesto el potencial de las biorrefinerías como alternativa para incrementar la competitividad y sostenibilidad del sector.

8. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió demostrar la viabilidad técnica de un proceso integrado para el aprovechamiento de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), basado en la obtención secuencial de aceite esencial y pectina mediante la combinación de técnicas experimentales y herramientas de simulación de procesos. La integración de ambas etapas hizo posible incrementar el aprovechamiento de la biomasa residual y generar productos de valor agregado a partir de un residuo agroindustrial con amplio potencial de aplicación industrial.

Los resultados experimentales evidenciaron que la destilación por arrastre de vapor constituye una tecnología adecuada para la recuperación de aceite esencial, obteniéndose un producto con propiedades fisicoquímicas compatibles con los rangos reportados para aceites esenciales de *Citrus sinensis*. Asimismo, la optimización de variables operativas, como el factor de empaque del material vegetal y la recirculación del hidrolato, permitió mejorar el desempeño del proceso y reducir el consumo de agua, fortaleciendo la eficiencia operativa del sistema.

La biomasa residual obtenida después de la extracción del aceite esencial conservó un contenido suficiente de sustancias pécticas, permitiendo la recuperación de una pectina con un grado de esterificación correspondiente a una pectina de alto metoxilo. Este resultado demuestra que la extracción secuencial de ambos productos es técnicamente compatible y que la primera etapa del proceso no compromete la calidad del producto obtenido en la segunda etapa.

El modelo desarrollado en Aspen Plus® reprodujo satisfactoriamente el comportamiento experimental del proceso mediante balances de materia, evidenciando una adecuada concordancia entre los resultados simulados y los obtenidos en laboratorio. Esta validación confirma que la simulación de procesos constituye una herramienta útil para el análisis del comportamiento del sistema y proporciona una base técnica para futuros estudios de escalamiento industrial.

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, el principal aporte de esta investigación consiste en integrar operaciones unitarias convencionales dentro de un esquema de valorización de biomasa apoyado por simulación computacional. Esta aproximación permite trascender la recuperación aislada de compuestos de interés y plantea un modelo de aprovechamiento integral que puede ser adaptado a otros residuos agroindustriales con características similares.

Finalmente, el proceso propuesto se alinea con los principios de la economía circular y el concepto de biorrefinería, al transformar un residuo agroindustrial en una fuente de materias primas para diferentes sectores industriales. En este sentido, la investigación aporta evidencia experimental y metodológica que respalda el desarrollo de estrategias orientadas a incrementar la sostenibilidad y el valor agregado de la agroindustria mediante el aprovechamiento integral de sus residuos.

9. RECOMENDACIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda ampliar la investigación mediante el desarrollo de estudios de escalamiento a nivel piloto e industrial que permitan validar el comportamiento del proceso integrado bajo condiciones reales de operación. La incorporación de balances de energía, análisis de integración térmica y simulaciones dinámicas contribuirá a optimizar el diseño del proceso y a mejorar su eficiencia operativa.

Asimismo, resulta pertinente realizar una evaluación técnico-económica que considere los costos de inversión, operación y mantenimiento del sistema propuesto, con el propósito de determinar su viabilidad comercial y facilitar su implementación en la industria de procesamiento de cítricos.

Desde la perspectiva ambiental, se recomienda complementar el estudio con un **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** y una evaluación de la huella de carbono del proceso integrado, con el fin de cuantificar los beneficios ambientales derivados del aprovechamiento secuencial de la cáscara de naranja en comparación con los métodos convencionales de disposición de residuos.

También se sugiere evaluar la aplicación del modelo desarrollado a otras biomásas agroindustriales con características similares, como residuos de limón (*Citrus limon*), mandarina (*Citrus reticulata*) o pomelo (*Citrus paradisi*), con el objetivo de analizar la adaptabilidad del proceso y ampliar su campo de aplicación dentro del concepto de biorrefinería.

Finalmente, se recomienda incorporar herramientas de optimización matemática y simulación avanzada que permitan evaluar diferentes escenarios operativos, optimizar el consumo de agua y energía, e integrar indicadores económicos, ambientales y técnicos para fortalecer la toma de decisiones durante el diseño y escalamiento de procesos de valorización de residuos agroindustriales.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aspen Technology. (2023). *Aspen Plus® V11 user guide*. Aspen Technology Inc.

Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>

European Commission. (2020). *A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union.

FAO. (2023). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Grover, N., Sharma, S., & Kaur, R. (2024). Sustainable extraction and characterization of pectin from citrus waste: Recent advances and industrial applications. *Food Hydrocolloids*, 147, 109231. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109231>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.

Rawat, K., Sharma, P., Kumar, V., & Singh, J. (2024). Citrus processing waste valorization: A sustainable biorefinery approach for essential oils, pectin and bioactive compounds. *Bioresource Technology*, 395, 130278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130278>

Ranjha, M. M. A. N., Irfan, S., Lorenzo, J. M., Shafique, B., Kanwal, R., Pateiro, M., Arshad, R. N., Roobab, U., Aadil, R. M., & Ameer, K. (2022). Valorization of citrus waste for sustainable food systems: A review. *Food Chemistry*, 392, 133307. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133307>

Teigiserova, D. A., Hamelin, L., & Thomsen, M. (2021). Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss. *Waste Management*, 124, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.009>

Towler, G., & Sinnott, R. K. (2022). *Chemical engineering design* (3rd ed.). Elsevier.

United Nations Environment Programme. (2021). *Food waste index report 2021*. UNEP.

Willats, W. G. T., Knox, J. P., & Mikkelsen, J. D. (2006). Pectin: New insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science & Technology*, 17(3), 97–104.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.008>