

Obtención de extractos antioxidantes de cáscara de café (*Coffea arabica* var. Cenicafé 1) mediante un proceso secuencial de extracción con CO₂ supercrítico y líquidos presurizados (PLE)

Laura Castro-Molina, Laura Enriquez-Jojoa, Rubén Camargo-Amado, Camilo Pardo-Castaño*.

Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, CL. 13 100-00, Cali, Colombia.
2026

*Autor correspondiente: camilo.pardo@correounivalle.edu.co

Resumen

En este trabajo se estudió la obtención de extractos antioxidantes a partir de la cáscara de café (*Coffea arabica* var. Cenicafé 1) mediante un proceso secuencial de extracción con CO₂ supercrítico y líquidos presurizados (PLE). Se empleó un diseño experimental 2⁴⁻¹ con tres puntos centrales, considerando como variables independientes la temperatura (40–80 °C), la presión (1000–2500 psi), el tamaño de partícula (100–1335 µm) y la concentración de etanol (0–100 % v/v). Las variables de respuesta, rendimiento de extracción y capacidad antioxidante (AC), se maximizaron para determinar las condiciones óptimas dentro del rango experimental estudiado. La mejor corrida experimental (corrida 5) se obtuvo a 60 °C, 1750 psi, 713 µm y etanol al 50 % v/v, alcanzando un rendimiento del 31.74 % y una capacidad antioxidante de 678.51 µmol TE/g de extracto seco (DE). A partir del análisis estadístico y la maximización de la deseabilidad global, se determinaron las condiciones óptimas de extracción: 60 °C, 1750 psi, 1335 µm y etanol al 100 % v/v, bajo las cuales se alcanzó un rendimiento del 40.72 %.

Posteriormente, se evaluó la aplicabilidad preliminar del extracto en la industria cosmeceútica, identificando su potencial incorporación en formulaciones capilares y productos de cuidado personal debido a su contenido de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y estimulantes. Con las condiciones óptimas de extracción se desarrolló el diseño preliminar de una planta industrial para el aprovechamiento de la cáscara de café, integrando las tecnologías de extracción con CO₂ supercrítico (SC-CO₂) y con líquidos presurizados (PLE). Finalmente, considerando las propiedades del extracto y los costos del proceso, se realizó un análisis financiero que evidenció que el proyecto es prefactible, con un periodo de retorno aproximado de 2 años y una tasa interna de retorno (TIR) del 62.28 %

Palabras clave: Cáscara de café, extracción, fluidos supercríticos, líquidos presurizados, antioxidantes.

Abstract

In this study, the production of antioxidant extracts from coffee husk (*Coffea arabica* var. Cenicafé 1) was investigated using a sequential extraction process combining supercritical CO₂ and pressurized liquid extraction (PLE). A 2⁴⁻¹ fractional factorial experimental design with three center points was employed, considering temperature (40–80 °C), pressure (1000–2500 psi), particle size (100–1335 µm), and ethanol concentration (0–100 % v/v) as independent variables. The response variables, extraction yield and antioxidant capacity (AC), were maximized to determine the optimal conditions within the studied experimental range. The best experimental run (run 5) was obtained at 60 °C, 1750 psi, 713 µm, and 50 % v/v ethanol, achieving an extraction yield of 31.74 % and an antioxidant capacity of 678.51 µmol TE/g of dry extract (DE). Based on statistical analysis and global desirability maximization, the optimal extraction conditions were determined as 60 °C, 1750 psi, 1335 µm, and 100 % v/v ethanol, under which an extraction yield of 40.72 % was achieved.

Subsequently, the preliminary applicability of the extract in the cosmeceutical industry was evaluated, identifying its potential incorporation into hair care formulations and personal care products due to its content of bioactive compounds with antioxidant and stimulating properties. Under the optimal extraction conditions, a preliminary industrial plant design was developed for the valorization of coffee husk, integrating supercritical CO₂ (SC-CO₂) and pressurized liquid extraction (PLE) technologies. Finally, considering the properties of the extract and process costs, a financial analysis was performed, indicating that the project is pre-feasible, with an approximate payback period of 2 years and an internal rate of return (IRR) of 62.28 %.

Keywords: Coffee husk, extraction, supercritical fluids, pressurized liquids, antioxidants.

Introducción

El café es un producto emblemático y un componente esencial de la cultura y economía de Colombia. Cultivado principalmente en regiones montañosas, el grano colombiano se distingue por su calidad excepcional y sabor característico, lo cual posiciona al país como uno de los principales productores y exportadores de café a nivel mundial [1]. Dentro de este panorama, el Valle del Cauca se destaca como una región clave en la producción cafetera del país. Este departamento cultiva más de 51.000 hectáreas de café arábigo, distribuidas en 39 de los 42 municipios, y con la participación activa de más de 22.000 familias caficultoras. El Valle del Cauca contribuye con aproximadamente el 11% de la producción nacional, con un volumen anual cercano a 1.200.000 sacos de 60 kilogramos [2].

En este contexto, el Centro Nacional de Investigación de Café (Cenicafé) de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) orienta sus esfuerzos a la investigación de nuevas variedades de café resistentes a plagas y enfermedades, así como la optimización de los procesos de producción para aumentar la calidad del grano y reducir los costos [3]. Como resultado de estas investigaciones se desarrolló la variedad Cenicafe 1, resultado de aproximadamente veinte años de investigación y obtenida a partir del cruce entre Caturra e híbrido de Timor 1343. Esta variedad fue concebida como respuesta a problemáticas emergentes en los sistemas cafeteros, tales como el cambio climático, el aumento de la temperatura y la incidencia creciente de plagas y enfermedades, entre otros [4].

Durante el procesamiento del café, solo se aprovecha aproximadamente el 5% del peso del fruto fresco, mientras que el 95% restante corresponde a residuos agroindustriales como la cáscara, pulpa, mucílago, cisco, pasillas, borra y tallos [5]. Entre ellos, la cáscara de café (CH, siglas en inglés) generada en la etapa de despulpado, se utiliza, comúnmente como fertilizante, material para compostaje, fuente de fibra, materia prima para infusiones, o simplemente se desecha. No obstante, su disposición inadecuada representa un riesgo ambiental significativo, ya que puede contaminar cuerpos de agua y suelos al liberar compuestos orgánicos que alteran el equilibrio de los ecosistemas locales [5].

Desde una perspectiva de sostenibilidad y economía circular, la CH constituye una biomasa con alto potencial de valorización, dado su contenido de compuestos bioactivos como cafeína, taninos y ácidos fenólicos (principalmente clorogénico y gálico), los cuales poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas [6]. Adicionalmente, su elevado contenido de fibra dietaria la convierte en un ingrediente funcional de interés para las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. [6]. Por tanto, resulta fundamental estudiar alternativas innovadoras de aprovechamiento para este residuo agroindustrial, que superen los enfoques tradicionales y contribuyan a la generación de valor agregado de forma ambientalmente responsable [6].

En los últimos años, la creciente necesidad de reducir el uso de sustancias químicas en los procesos industriales ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de extracción, conocidas como tecnologías verdes [7]. Las técnicas verdes se utilizan para la extracción de compuestos bioactivos de las plantas y los alimentos, generando el menor impacto ambiental posible. Algunas de las tecnologías verdes más usadas son: líquidos presurizados, fluidos supercríticos, ultrasonidos, pulsos eléctricos de alto voltaje, entre otras [7,8].

La extracción con fluidos supercríticos emplea sustancias que se encuentran por encima de su temperatura y presión críticas, condición en la cual presentan simultáneamente propiedades de líquidos y gases. La viscosidad relativamente baja y la alta difusividad de los fluidos supercríticos mejoran la difusión y la transferencia de masa, reduciendo así el tiempo de extracción. Además, poseen una

densidad similar a la de un líquido y, por tanto, un elevado poder de solvatación. El dióxido de carbono supercrítico es el fluido más utilizado, ya que es económico, se encuentra disponible en alta pureza y es inocuo [8].

La extracción con líquidos presurizados (PLE, siglas en inglés) se presenta como un enfoque altamente eficiente y sostenible, según diversos estudios. Esta técnica de extracción emplea líquidos a moderada presión y, en algunos casos, a temperaturas elevadas, para obtener compuestos bioactivos de materiales sólidos, como las matrices vegetales [8,9]. Este método facilita la ruptura de las células de la matriz, favorece la solubilidad de los compuestos en el solvente y promueve la desorción de los analitos, reduciendo los tiempos de extracción y del consumo de solvente y, en consecuencia, una disminución del consumo de energía y de los costos [9,10].

Es importante resaltar que hasta la fecha no se han reportado estudios que evalúen la obtención de extractos con actividad antioxidante a partir de la CH de la variedad Cenicafé 1 mediante PLE, lo que otorga a este trabajo un carácter original y de relevancia científica en el aprovechamiento sostenible de los subproductos del café. En consecuencia, no existe información disponible sobre los protocolos adecuados de pretratamiento ni sobre las condiciones operativas que permitan maximizar el rendimiento y la capacidad antioxidante del extracto. Por tal razón, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la extracción de compuestos bioactivos a partir de la CH de la variedad Cenicafé 1 mediante un proceso secuencial de SC-CO₂ y PLE. Para ello, se analizó el efecto de la temperatura, la presión, el tamaño de partícula y la proporción hidroetanólica sobre el rendimiento de extracción y la capacidad antioxidante del extracto. Además, se caracterizó el extracto obtenido y se realizó una evaluación técnica y financiera preliminar del proceso de extracción a escala industrial.

1. Materiales y métodos

1.1. Materia prima

La CH (*Coffea arabica* var. Cenicafé 1) fue suministrada por un productor local del municipio de Toro, Valle del Cauca, Colombia, a 1700 msnm. El contenido de humedad inicial de la muestra fue del 75 %, determinado mediante el método oficial AOAC 925.10 [11]. Previo al secado, se eliminó el exceso de humedad superficial utilizando una tela filtrante. Luego, la muestra se secó en un horno de convección a 50 °C durante 12 h, hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 5%. El material seco se molió y tamizó, obteniéndose fracciones con tamaños de partícula promedio de 1335 µm, 713 µm y 100 µm, respectivamente. Finalmente, las muestras se almacenaron al vacío y se conservaron a -5 °C hasta su uso experimental.

1.2. Químicos

El agua desionizada se obtuvo mediante un sistema de desionización Aqua Max-Basic 360, disponible en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle. El etanol anhidro (99.6% v/v) fue adquirido de INQUIMICOL S.A.S. El dióxido de carbono (CO₂) con una pureza del 99.9% v/v fue suministrado por Oxiequipos en cilindros presurizados aptos para aplicaciones experimentales.

1.3. Método de extracción

1.3.1. Extracción Soxhlet

Se realizó una extracción exhaustiva mediante la técnica Soxhlet con el objetivo de obtener una aproximación del rendimiento máximo de extracción. Para ello, se trabajó de manera consecutiva sobre la misma muestra, utilizando un único lote de aproximadamente 25 g de CH. Inicialmente, la muestra se sometió a extracción con hexano durante 4 horas a la temperatura de ebullición del disolvente (68.7 °C). Posteriormente, la misma materia prima se empleó en una segunda extracción, esta vez con una mezcla binaria de agua y etanol (50% v/v) como disolvente. Este segundo proceso se llevó a cabo durante 8 horas, a la temperatura de ebullición de la mezcla (~85 °C). Los tiempos de extracción se definieron con base en la literatura. Finalmente, en ambos casos, los disolventes fueron eliminados por rotaevaporación para concentrar los extractos.

1.3.2. Extracción con CO₂ supercrítico (SC-CO₂)

La Figura 1 presenta el esquema del equipo de extracción con fluidos supercríticos. Las extracciones se realizaron en un extractor con una capacidad de 230 mL, ubicado en el laboratorio de Investigación En Valorización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle. La materia prima pretratada se sometió a un proceso de desgrasado mediante extracción supercrítica con CO₂ (SC-CO₂, siglas en inglés), con el objetivo de recuperar lípidos y otros compuestos bioactivos de carácter apolar presentes en la CH, facilitando la extracción de otros compuestos en etapas posteriores [12]. Las condiciones operativas (50 °C y 300 bar) se seleccionaron con base en reportes previos de la literatura especializada [13]. Durante todas las corridas se mantuvo un flujo de solvente constante de 37 g/min para garantizar una relación S/F de 0.3 min⁻¹.

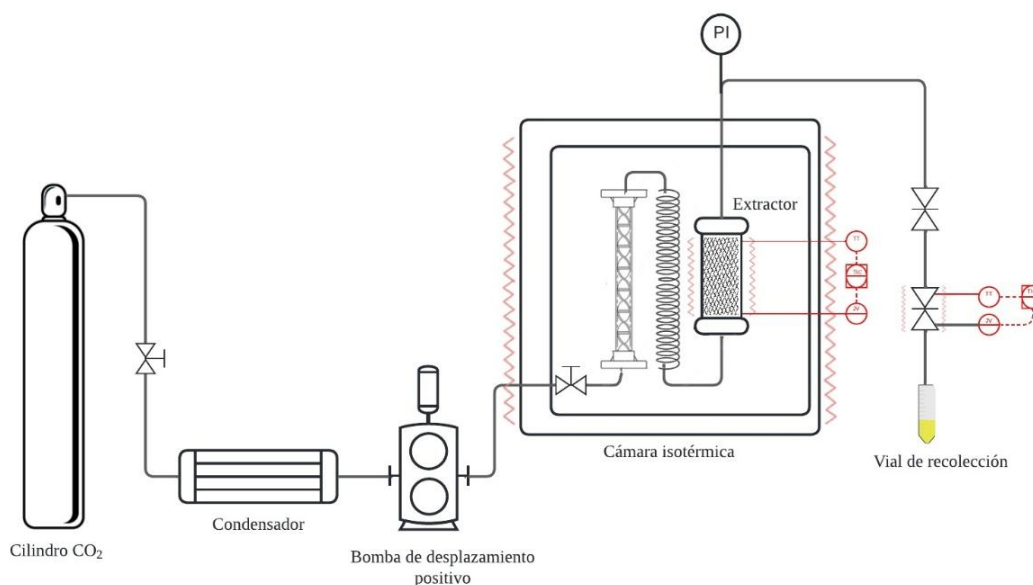


Figura 1. Esquema del equipo experimental para SC-CO₂.

1.3.3. Extracción con líquidos presurizados (PLE)

La Figura 2 muestra el esquema general del sistema de extracción por líquidos presurizados. El equipo cuenta con un extractor cilíndrico de 89.9 mL, fabricado en acero inoxidable 316, con una presión máxima de operación de 690 bar. Este extractor está equipado con una chaqueta de calentamiento controlada por resistencias eléctricas, cuya temperatura se regula mediante un sistema de control proporcional, lo que permite mantener condiciones térmicas estables dentro del recipiente. Además, el sistema incluye un intercambiador de calor tipo serpentín, que precalienta el solvente antes de su ingreso al extractor; este componente opera con el mismo sistema de control térmico que la chaqueta del extractor. El flujo del solvente se impulsa mediante una bomba de alta presión (HPLC JASCO PU-2087 Plus), mientras que la presión del sistema se ajusta manualmente mediante una válvula de aguja, permitiendo un control preciso de la presión del disolvente durante el proceso de extracción.

El proceso de extracción se llevó a cabo empleando la CH desgrasada por SC-CO₂. Para cada corrida experimental, se cargaron aproximadamente 25 g de materia prima en la canasta del extractor, y el volumen restante se completó con esferas de vidrio de 1 mm de diámetro. El flujo del solvente se fijó en 10.5 g/min para garantizar una relación S/F de 0.4 min⁻¹ en todas las corridas. Los extractos, previamente diluidos, se recolectaron en viales de ámbar de 250 mL cada 20 minutos durante un período total de 120 minutos. Cada vial fue rotulado de acuerdo con el tiempo de recolección correspondiente para facilitar el análisis posterior. El tiempo total de extracción se mantuvo constante en 120 minutos, cuya determinación puede consultarse en el Anexo B2.

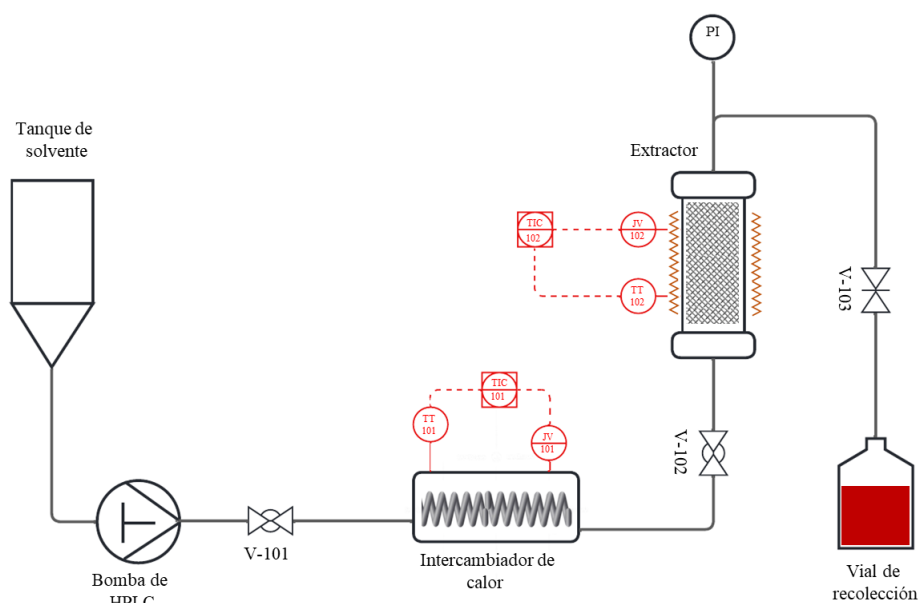


Figura 2. Esquema del equipo experimental para extracción por PLE.

1.3.4. Separación del solvente

Los extractos diluidos se concentraron utilizando un sistema de evaporación rotatoria (Eyela N-1110) acoplado a una bomba de vacío (ULVAC DTC-22A), la cual operó a una presión constante de 100 mbar. Para preservar la integridad de los compuestos bioactivos presentes en el extracto, la eliminación del solvente se realizó a una temperatura controlada de 50 °C. Bajo estas condiciones, se logró eliminar aproximadamente el 95 % del volumen total de solvente. Posteriormente, los extractos concentrados se sometieron a un proceso de secado en horno de convección a 50 °C durante 72 horas.

1.4. Diseño experimental (DoE)

Se empleó un diseño experimental factorial fraccionado 2^{4-1} , con tres puntos centrales, en el marco de la metodología de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés). En este diseño se evaluó el efecto de cuatro variables independientes: temperatura (T), presión (P), concentración de etanol en el disolvente (C_{Et}) y tamaño de partícula (TP), sobre dos variables de respuesta: rendimiento de extracción (Y) y capacidad antioxidante (AC). La aplicación de este enfoque facilitó la identificación de condiciones operativas favorables dentro del rango experimental seleccionado, así como la determinación de posibles interacciones entre los factores estudiados, con el objetivo de maximizar tanto el rendimiento como la capacidad antioxidante del extracto obtenido a partir de la CH mediante PLE.

El rendimiento global de la extracción (Y) se calculó mediante la Ecuación 1, como el porcentaje resultante de la relación entre la masa del extracto obtenido y la masa seca de la muestra utilizada en el proceso de extracción.

$$Y(\%) = \frac{\text{masa de extracto seco}}{\text{masa de MP seca}} \times 100 \quad \text{Ec.1}$$

En la Tabla 1 se presentan los factores y niveles seleccionados para este estudio, los cuales fueron definidos con base en antecedentes reportados en la literatura científica, así como en las condiciones operativas factibles de alcanzar con el sistema de PLE utilizado.

Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental propuesto

Factor	Nivel bajo (-)	Punto central (0)	Nivel alto (+)
T (°C)	40	60	80
P (psi)	1000	1750	2500
C _{Et} (v/v%)	0	50	100
TP (μm)	100	713	1335

Se estableció un límite máximo de operación de 80 °C para la temperatura del sistema, con el fin de evitar la degradación térmica de compuestos bioactivos sensibles presentes en los extractos [14]. Por otro lado, los niveles de presión empleados se establecieron conforme a los rangos comúnmente reportados en la literatura para PLE. Se verificó que la presión máxima aplicada no excediera los 3000 psi, límite a partir del cual se observó un alto riesgo de sobrepresurización del sistema de bombeo, lo que podría interrumpir el proceso de extracción. Por tal motivo, se definió un valor máximo operativo de 2500 psi como el nivel alto de presión para asegurar la estabilidad y continuidad del sistema durante el procedimiento. Además, el uso de presiones elevadas, junto con una menor tensión superficial del disolvente, promueve su ingreso en los poros de la matriz sólida, facilitando el contacto con los analitos y mejorando su recuperación [14].

Adicionalmente, se consideró fundamental evaluar el efecto del tamaño de partícula de la cáscara de café y la concentración de etanol en el disolvente hidroetanólico sobre la eficiencia del proceso de PLE. El tamaño de partícula es un factor crucial en los procesos de extracción, ya que influye directamente en la superficie de contacto entre la matriz vegetal y el disolvente. Una reducción en el tamaño de partícula incrementa dicha superficie, lo que favorece la difusión del solvente al interior del material

vegetal y, por tanto, mejora la liberación de compuestos bioactivos. Sin embargo, un tamaño excesivamente pequeño puede generar problemas operativos, como obstrucciones en los sistemas de filtración o dificultades en la recuperación del extracto [15].

La selección del disolvente está estrechamente vinculada a la solubilidad del analito, su difusividad en el medio y las características fisicoquímicas de la matriz. En este sentido, la concentración de etanol en la mezcla hidroetanólica modula directamente la polaridad del disolvente, afectando de manera decisiva la solubilidad, la selectividad y la cinética de extracción de diversos metabolitos. Esta variación en la polaridad influye particularmente en la recuperación de compuestos fenólicos y alcaloides, cuya afinidad por el disolvente depende de sus propiedades estructurales. De esta forma, una proporción óptima de etanol permite maximizar la extracción de los metabolitos de interés, mejorando tanto el rendimiento como la calidad del extracto final [14].

1.5. Curvas de rendimiento

Una vez eliminado el solvente, se determinó la masa de extracto recuperada en cada vial tras la PLE. A partir de los datos de masa acumulada en función del tiempo, se construyó una curva de extracción para cada corrida experimental. El propósito de este análisis fue evaluar el comportamiento cinético del proceso y establecer una base sólida para el ajuste de un modelo matemático.

1.6. Análisis químico de los extractos

1.6.1. Contenido de polifenoles totales (TPC)

El contenido de polifenoles totales se realizó mediante el método de Folin-Ciocalteu [16], siguiendo protocolos estandarizados. Se utilizó ácido gálico como compuesto patrón para la elaboración de la curva de calibración. La absorbancia de las soluciones se registró a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Visible. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto seco (mg GAE/g DE).

1.6.2. Capacidad antioxidante (AC)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el método de absorbancia de radicales de oxígeno (ORAC), descrito por Prior, et al [17]. Este método determina la capacidad antioxidante al cuantificar la protección de los compuestos frente a radicales peroxilo generados por AAPH (2,2'-Azobis-(2-aminopropano)-dihidrocloreto). Estos radicales oxidan la fluoresceína y disminuyen su fluorescencia; en presencia de antioxidantes, dicha disminución se atenúa. La cinética de degradación se registra

mediante el área bajo la curva de fluorescencia, utilizando longitudes de onda de excitación y emisión de 485 y 520 nm, respectivamente. La cuantificación se realizó empleando Trolox como estándar de referencia, y los resultados se expresaron como unidades equivalentes de μmol Trolox/ g de extracto seco ($\mu\text{mol TE/ g DE}$).

1.7. Análisis de aplicabilidad

Para el análisis de aplicabilidad, se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos Scopus con el propósito de identificar estudios relacionados con el uso industrial de extractos obtenidos a partir de la CH. No obstante, debido a la ausencia de reportes específicos sobre extractos derivados de la CH, la revisión se orientó hacia los compuestos bioactivos presentes en el extracto y sus potenciales aplicaciones en productos del sector cosmético.

1.8. Análisis técnico y financiero preliminar

1.8.1. Escalado del proceso secuencial SC-CO₂ y PLE

El proceso de escalado se desarrolló en el contexto de una biorrefinería integrada que combina los procesos de SC-CO₂ y PLE. El dimensionamiento de los equipos se llevó a cabo empleando las mejores condiciones de operación determinadas experimentalmente para cada uno de los procesos, bajo el supuesto de que los rendimientos de extracción obtenidos a escala de laboratorio se conservan al ser transferidos a escala industrial.

Durante el proceso de escalado, se conservan constantes los principales parámetros operativos establecidos en la fase experimental a escala de laboratorio, tales como la relación entre el flujo de solvente y la materia prima cargada al extractor (S/F), la densidad de la CH, la relación altura-diámetro del extractor y el tiempo de extracción. El dimensionamiento de los equipos necesarios para el proceso secuencial de extracción se realizó mediante heurísticas de diseño y balances de materia y energía.

En el caso de los intercambiadores de calor, el dimensionamiento se realizó a partir de los balances de energía necesarios para mantener el solvente en la temperatura de operación requerida en cada etapa del proceso. El diámetro, la longitud y el número de vueltas del serpentín se definieron de manera que se maximizara el área de transferencia térmica sin generar pérdidas de carga excesivas, asegurando gradientes térmicos suaves que evitaran la degradación de compuestos termosensibles. Por su parte, la potencia requerida por las bombas se determinó mediante la ecuación general de la energía, considerando las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios, la diferencia de presión necesaria en el sistema y el caudal de operación. Con base en estos parámetros, se seleccionaron bombas capaces de

operar de manera continua y estable bajo las condiciones de presión características de los procesos de SC-CO₂ y PLE.

Para la recuperación del CO₂ posterior a la extracción supercrítica, se incorporó un separador ciclónico diseñado para efectuar la separación gas-líquido. Los parámetros geométricos principales como el diámetro y la altura se definieron siguiendo heurísticas de diseño para separadores ciclónicos. Para el sistema de separación de los extractos obtenidos mediante PLE, se adoptó una estrategia combinada basada en membranas y una columna de película fina. La selección de las membranas se realizó en función de su resistencia a solventes orgánicos, su selectividad hacia los compuestos de interés y su compatibilidad con los caudales propios de una operación continua. El dimensionamiento se efectuó a partir del flujo permeado requerido y del área efectiva necesaria para lograr la separación primaria del solvente.

Posteriormente, los extractos concentrados se sometieron a una columna de película fina diseñada para operar a baja presión y temperatura moderada, permitiendo una evaporación rápida del solvente residual sin exponer los compuestos bioactivos a tiempos de residencia prolongados. La altura útil, el diámetro interno y la velocidad de rotación del rotor se definieron considerando la viscosidad de las mezclas, la tasa de alimentación y la cinética de separación observada en los ensayos a escala laboratorio.

Los tanques de almacenamiento para los solventes fueron dimensionados en función de los ciclos de producción y del balance general de masas del proceso. Se incorporaron márgenes de holgura adecuados para amortiguar fluctuaciones de caudal y asegurar la continuidad operativa del sistema. Finalmente, se elaboró un diagrama de instrumentación y tubería (P&ID, siglas en inglés) que integra los extractores, serpentines, módulos de membranas, columna de película fina, tanques y líneas de servicio, incluyendo válvulas, sensores y controles necesarios para garantizar una operación estable y segura del proceso.

1.8.2. Parámetros económicos

Se utilizó el método propuesto por Turton et al. [18], para calcular el costo de producción de los extractos (CM), el cual se estimó a partir del capital de inversión (FCI), el costo de la mano de obra (COL), el costo de las materias primas (CRM), el costo del tratamiento de residuos (CWT) y el costo de los servicios (CUT).

$$CM = 0.304CI + 2.73COL + 1.23(CRM + CWT + CUT) \quad \text{Ec. 2}$$

La estimación del capital de inversión (FCI), correspondiente al costo de los equipos, sus accesorios y su instalación, se realizó con base en una cotización proporcionada por una empresa local. La Ecuación 3 describe la corrección del costo del equipo en función de la capacidad, donde C_1 y C_2 representan los costos de los equipos con capacidades Q_1 y Q_2 , respectivamente. El parámetro n varía generalmente entre 0.48 y 0.87, dependiendo del tipo de equipo, aunque comúnmente se adopta un valor de 0.6. Por su parte, la Ecuación 4 expresa la corrección del costo del equipo considerando el valor del dinero en el tiempo, utilizando índices de actualización de costos disponibles en la literatura.

$$C_1 = C_2 \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^n \quad \text{Ec. 3}$$

$$C_1 = \left(\frac{INDEX_1}{INDEX_2} \right) C_2 \quad \text{Ec. 4}$$

El Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC, por sus siglas en inglés), el cual representa el costo promedio ponderado de los recursos financieros utilizados en el proyecto, considerando la proporción de capital propio y deuda dentro de la estructura de financiamiento, se estimó empleando la Ecuación 5. En este estudio, se asumió una participación del 70% de capital propio y 30% de deuda. Además, se consideró una tasa de interés efectiva anual (IEA) del 27.7%, calculada a partir de la tasa de interés promedio para el año 2025 y ajustada mediante un factor de incremento de tres veces para reflejar condiciones de riesgo industrial. Se adoptó una tasa de impuesto de renta del 33% y un costo de oportunidad del 30%.

$$WACC = (1 - IR) \times IEA \times 0.7 + \text{Costo de oportunidad} \times 0.3 \quad \text{Ec. 5}$$

Finalmente, para evaluar la viabilidad del proceso, se realizó un análisis técnico y financiero preliminar que incluyó la estimación del valor presente neto (VPN), con el fin de determinar la rentabilidad económica del proyecto, y un análisis de flujo de caja, a partir del cual se calculó la tasa interna de retorno (TIR). Estos indicadores permitieron establecer la prefactibilidad del proceso de extracción bajo las condiciones operativas propuestas.

2. Resultados y discusión

2.1. Curvas de rendimiento de las pruebas por PLE

La Figura 2 presenta las curvas de rendimiento de los compuestos bioactivos extraídos a partir de la cáscara de café mediante PLE. El modelo propuesto por Pardo-Castaño et al. [19], se correlacionó con los datos experimentales utilizando el software MATLAB R2025a y el método Simplex. El ajuste de

los tres parámetros del modelo a los datos experimentales requirió la determinación del rendimiento máximo de soluto extraíble en la matriz, cuyo valor obtenido mediante extracción Soxhlet fue de 31.76%. Se logró una correlación simultánea de 11 curvas experimentales, obteniéndose una desviación media relativa absoluta (AARD) de 3.78%, lo que evidencia la excelente precisión del modelo propuesto para describir el comportamiento de la extracción. Los resultados de los parámetros ajustables del modelo y el comportamiento de las curvas se encuentran en la sección C de los anexos.

El valor del parámetro x_m fue de 0.59, menor a 1, lo que indica que la masa inicial de soluto removible es superior a la masa de soluto presente en la primera monocapa, siendo x_m un indicador de la cantidad de soluto disponible para la primera capa de adsorción. También se observa que, en la mayoría de los casos, el parámetro K disminuye a medida que el valor de y^* aumenta; K representa la relación entre las constantes de equilibrio del soluto en la primera monocapa y en las capas subsecuentes, reflejando así la facilidad de transferencia entre capas. Por otra parte, los valores más altos de K se obtienen a temperaturas de 80 °C y 60 °C, mientras que el valor más bajo se presenta a 40 °C, evidenciando que este parámetro depende significativamente de la temperatura. De igual manera, K aumenta conforme incrementa la concentración de etanol en el solvente. En contraste, el mayor valor de y^* se obtiene a la temperatura más baja, y este parámetro tiende a aumentar cuando disminuye la concentración de etanol en el solvente; y^* está relacionado con la solubilidad del soluto en el solvente, corregida por las limitaciones difusionales, reflejando así la disponibilidad efectiva del soluto para la extracción.

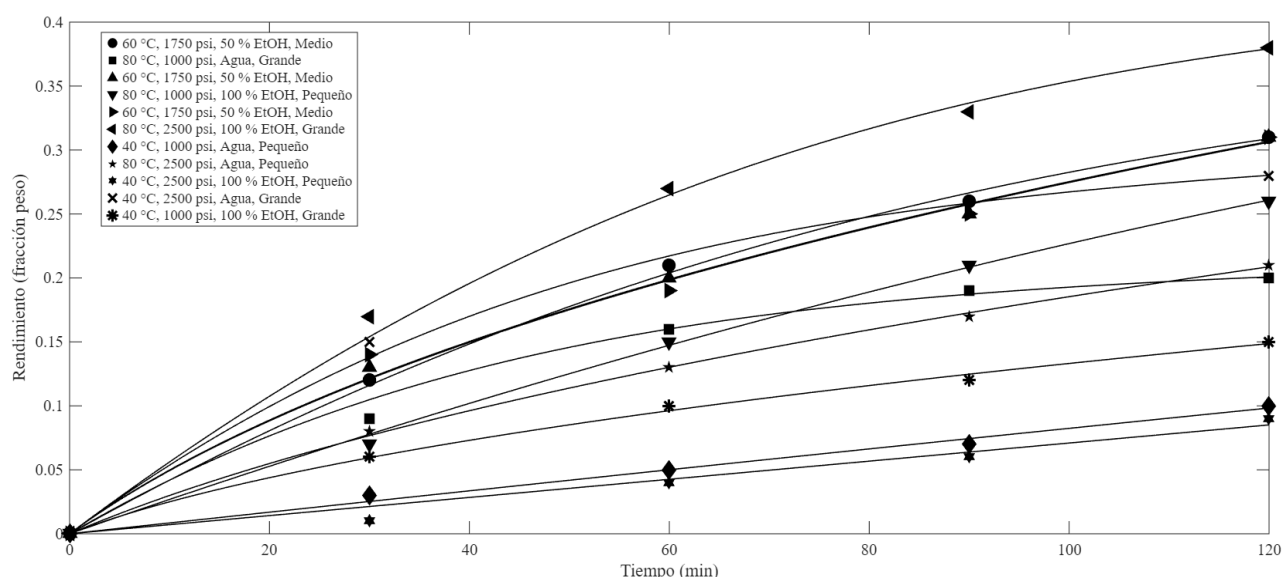


Figura 3. Curvas de rendimiento de extracción de cáscara de café mediante PLE con mezclas de etanol y agua. Los puntos representan los datos experimentales y las líneas continuas la correlación (AARD =3.78%) usando el modelo propuesto por Pardo-Castaño et al [19].

2.2. Análisis químico de los extractos

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para el rendimiento de extracción y la capacidad antioxidante correspondientes a cada corrida del diseño experimental. El análisis de polifenoles totales (TPC) se realizó únicamente para las corridas seleccionadas con rendimientos alto, medio y bajo. Es importante señalar que para expresar los valores de AC y TPC en función del gramo de extracto seco, fue necesario multiplicar los valores experimentales por el rendimiento de extracción obtenido en cada corrida, garantizando así una comparación adecuada entre las condiciones evaluadas.

Se observa que los valores de rendimiento varían entre 9.26 % y 38.21 %, lo que evidencia una marcada influencia de las condiciones operacionales sobre la eficiencia del proceso de extracción. El mayor rendimiento se obtuvo en la corrida 6, correspondiente a los niveles altos de temperatura, presión, concentración de etanol y tamaño de partícula, lo cual refleja una sinergia positiva entre estos factores. Este comportamiento sugiere que la combinación de alta temperatura y presión incrementa la difusividad y la solubilidad de los compuestos bioactivos en el solvente, favoreciendo una mayor transferencia de masa entre la matriz sólida y la fase líquida.

Tabla 2. Rendimiento (Y), capacidad antioxidante (AC) y concentración de polifenoles totales (TPC) por g de extracto seco (DE) de cáscara de café obtenido mediante PLE en 120 minutos.

Corrida #	Patrón (T, P, C _{ET} , TP)	Y (%)	AC (μ mol TE/DEg)	TPC (mg GAE/DEg)
1	0000	31.38	585.61	-
2	+--+	20.47	350.85	-
3	0000	31.88	632.61	-
4	+ - + -	26.62	419.08	4.11
5	0000	31.74	678.51	-
6	++++	38.21	435.91	5.03
7	----	10.44	135.45	-
8	++--	21.01	316.44	-
9	-++-	9.26	132.95	1.28
10	-+-+	28.47	740.48	-
11	--++	15.26	494.84	-

En cuanto a la capacidad antioxidante, los valores oscilaron entre 132.95 y 740.48 μ mol TE/DEg, siendo el valor más alto registrado en la corrida 10. Este resultado sugiere que la presión elevada y el tamaño de partícula grande favorecen la liberación y solubilización de compuestos antioxidantes, aun bajo

condiciones de temperatura baja y usando agua como solvente. No obstante, analizar estos resultados de forma aislada podría limitar la identificación de tendencias generales, por lo que, es necesario considerar las interacciones entre factores.

Por otro lado, el máximo contenido de TPC se obtuvo en la corrida 6, la cual corresponde a una concentración de etanol de 100%. Diversos estudios indican que altas concentraciones de etanol promueven la extracción de compuestos fenólicos, dado que el etanol reduce la constante dieléctrica del disolvente y, por tanto, incrementa la solubilidad de estos compuestos [20]. De manera preliminar, también se observa que las temperaturas más elevadas tienden a incrementar el TPC, mientras que la presión y el tamaño de partícula no muestran una influencia marcada sobre esta variable.

2.3. Efecto de la temperatura, la presión, la concentración de etanol y el tamaño de partícula en la extracción de compuestos bioactivos mediante PLE

El análisis estadístico de los resultados se realizó utilizando el software JMP 18, con el propósito de ajustar un modelo matemático para cada variable de respuesta. En primera instancia, se evaluó la normalidad de los datos experimentales mediante la prueba de Shapiro–Wilk, la cual permite determinar si la distribución de los datos se aproxima a una distribución normal, condición necesaria para garantizar la validez de los análisis estadísticos basados en modelos lineales. Los resultados obtenidos mostraron valores p de 0.9381 y 0.908 para las variables Y y AC respectivamente. Dado que ambos valores son superiores al nivel de significancia de 0.05 se acepta la hipótesis nula, lo que indica que los datos presentan una distribución normal. Este resultado confirma la validez de los datos para la aplicación de técnicas de análisis de varianza (ANOVA) y la posterior modelación estadística de las respuestas.

Una vez verificada la normalidad de los datos, se procedió a realizar el análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de determinar la significancia estadística de los factores experimentales y de sus efectos de interacción sobre las variables de respuesta. Este análisis permitió identificar cuáles parámetros del proceso ejercieron una influencia significativa en el rendimiento de extracción y en la capacidad antioxidante, con un nivel de confianza del 95%. La Tabla 3 muestra los valores p obtenidos para los factores principales y las interacciones.

De manera preliminar, se observó que la interacción entre la temperatura y la presión (T^*P) presentó un valor de p elevado, indicando que dicha interacción no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta. En consecuencia, se decidió eliminar este término del modelo con el fin de mejorar la precisión del ajuste. Una vez eliminada la interacción T^*P , se evidenció que el menor ajuste del modelo se presentaba en los puntos centrales del diseño experimental, lo que sugiere la presencia de efectos no lineales en la respuesta. Para corregir esta desviación y capturar adecuadamente

la curvatura observada en los datos, se incorporó el término cuadrático correspondiente a la temperatura (T*T), asociado a la interacción binaria de segundo orden. Las gráficas de los modelos predictivos para las variables de respuesta se pueden encontrar en el Anexo D.

Tabla 3. Resumen de efectos de los factores sobre las variables de respuesta.

Factor	Valor p
T	0.18765
TP	0.20016
T*CET	0.2327
T*TP	0.23736
P	0.40883
T*P	0.70329
CET	0.74557

En la Tabla 4 se presenta el resumen final de efectos de los factores sobre las variables de respuestas luego de refinar el modelo matemático. Se puede notar que todos los efectos presentan valores $p < 0.05$, lo que indica que influyen significativamente en la respuesta global del proceso. Los efectos principales, binario y cuadrático la temperatura fueron las variables más relevantes. Esto confirma que la temperatura tiene un efecto dominante tanto de forma individual como combinada, afectando de manera no lineal la eficiencia de la extracción. Asimismo, la presión, el tamaño de partícula y la concentración de etanol también mostraron una influencia estadísticamente significativa, aunque menor.

Tabla 4. Resumen final de efectos de los factores sobre las variables de respuesta.

Factor	Valor p
T*T	0.00001
T	0.00001
T*CET	0.00001
TP	0.00001
P	0.00003
T*TP	0.00021
CET	0.00064

El diseño experimental utilizado corresponde a un diseño fraccional $2^{(4-1)}$ con resolución IV, con generador $D = ABC$, cuya correlación es destacable puesto que R^2 y $R^2_{\text{ajust}} > 0.85$ y el valor $p < 0.05$. Por tanto, los efectos principales están aliados con las interacciones de tres factores y las interacciones de dos factores están aliados con las restantes de dos factores. En la Tabla 5 se presentan los coeficientes del modelo ajustado para cada variable de respuesta, el cual se expresa mediante la Ecuación 6:

$$Y = \beta'_0 + \sum_{i=1}^4 \beta'_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} \beta'_{ij} X_i X_j \quad \text{Ec. 6}$$

Donde X_i están codificados en $[-1, +1]$. Dado el generador $X_4 = X_1 X_2 X_3$, los coeficientes primados β' representan combinaciones (aliasing) de coeficientes del modelo completo; en particular $\beta'_0 = \beta_0 + \beta_{1234}$. Por tanto, los efectos principales quedan confundidos con efectos de orden tres, y las interacciones de dos factores quedan emparejadas según las ecuaciones $\beta'_{ij} = \beta_{ij} + \beta_{kl}$, donde i y j corresponden a los factores de la interacción incluida en el modelo, mientras que k y l representan los factores de la interacción con la cual está aliada (confundida) según la estructura del generador del diseño. En este caso, dichas parejas de factores provienen directamente del generador $X_4 = X_1 X_2 X_3$ lo cual determina las combinaciones de aliasado entre interacciones de dos factores.

Tabla 5. Coeficientes del modelo de correlación para las variables de respuesta

Coeficiente	Y (%)	AC ($\mu\text{mol TE/DEg}$)
β_0	31.66	632.24
β_1	5.36	2.32
β_2	3.2	28.19
β_3	1.12	-7.55
β_4	4.39	127.27
β_{13}	4.72	54.48
β_{14}	-1.62	-114.16
β_{11}	-10.45	-253.99
R^2	0.99	0.97
R^2_{adj}	0.99	0.90

La temperatura se identificó como un factor influyente en las variables de respuesta, lo que evidencia su papel esencial en la solubilización de compuestos bioactivos durante el proceso de extracción. A medida que la temperatura se incrementa, se reducen las fuerzas intermoleculares entre el soluto y la

matriz vegetal tales como las fuerzas de Van Der Waals, los enlaces de hidrógeno y las interacciones dipolo-dipolo, lo que favorece la difusión del solvente y la solubilización de los compuestos de interés [21,22]. Además, el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad y la tensión superficial del disolvente, facilitando su penetración en la matriz y, en consecuencia, una extracción más eficiente [23,24]. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde las corridas realizadas a temperaturas más elevadas presentaron mayores rendimientos de extracción. Dichos resultados confirman que el incremento térmico potencia la movilidad molecular y mejora la transferencia de masa entre la fase sólida y líquida, optimizando la recuperación de compuestos bioactivos a partir de la CH.

Por otra parte, la concentración de etanol en el disolvente representa otro factor crítico en el proceso de extracción, debido a que la elección del solvente es determinante en la eficiencia del método PLE. Este debe ser capaz de solubilizar selectivamente los compuestos objetivo, minimizando la coextracción de componentes no deseados [20]. En la Tabla 2 se observa que el mayor rendimiento de extracción se obtuvo con una concentración de etanol del 100% (corrida 6), seguido de los tres puntos medios con una concentración del 50% v/v (corrida 1, 3 y 5), lo que sugiere que concentraciones más bajas de etanol favorecen la extracción de compuestos fenólicos más polares responsables de la actividad antioxidante del extracto. Este comportamiento puede atribuirse a que el agua, al poseer una mayor constante dieléctrica, incrementa la solubilidad de los compuestos hidrofílicos, mientras que el etanol facilita la disolución de moléculas menos polares [20]. Por lo tanto, la combinación adecuada de ambos solventes permite alcanzar un equilibrio óptimo de polaridad, promoviendo una extracción más selectiva y eficiente de los compuestos bioactivos presentes en la CH.

En general, la difusión de los analitos desde la matriz sólida hacia el disolvente de extracción puede aumentarse considerablemente al reducir el tamaño de partícula, ya que un menor tamaño de partícula incrementa el área superficial expuesta, favoreciendo el contacto sólido-líquido y acelerando el proceso de transferencia de masa. Sin embargo, en algunas matrices vegetales, la reducción excesiva del tamaño de partícula puede generar aglomeración y compactación del material, formando estructuras densas que obstruyen el flujo del disolvente y limitan su penetración durante la extracción [25]. Los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio evidenciaron que el tamaño de partícula más grande favoreció tanto el rendimiento de extracción como la capacidad antioxidante del extracto. Este comportamiento sugiere que, en el caso de la CH, partículas de mayor tamaño permiten una mejor permeabilidad del disolvente dentro del lecho sólido, reduciendo la resistencia al flujo y evitando la compactación asociada con partículas finas. Bajo estas condiciones, el disolvente presurizado puede circular de manera más uniforme a través de la matriz, promoviendo una transferencia de masa más eficiente y, por ende, una recuperación superior de compuestos bioactivos.

Aunque en diversos estudios la presión no se considera un parámetro determinante en la extracción de compuestos bioactivos a partir de matrices vegetales, los resultados obtenidos en el presente trabajo evidencian una influencia significativa en el proceso de extracción. Se observó que, presiones moderadas a altas (1750–2500 psi) favorecieron tanto el rendimiento de extracción como la capacidad antioxidante de los extractos. Este comportamiento puede atribuirse a que la presión afecta directamente la densidad y difusividad del disolvente, incrementando su capacidad para penetrar la matriz vegetal y solubilizar los compuestos de interés [9]. El incremento de la presión mejora la transferencia de masa y permite mantener el disolvente en estado líquido a temperaturas elevadas, evitando su evaporación y asegurando una mayor estabilidad del sistema [9]. En conjunto, estos efectos contribuyen a optimizar la eficiencia del proceso de extracción, resaltando que, aunque tradicionalmente se subestima su influencia, la presión puede desempeñar un papel relevante en la recuperación de compuestos fenólicos y antioxidantes cuando se combina con condiciones adecuadas de temperatura, concentración de etanol y tamaño de partícula.

Dado que hasta el momento no se han reportado estudios sobre la extracción de compuestos bioactivos a partir de cáscara de café de la variedad Cenicafé 1 mediante PLE, resulta limitado establecer comparaciones directas con resultados previos. Sin embargo, Costa et al. [26] evaluaron la obtención de fitoquímicos a partir de cáscara de café (variedad Arábica) utilizando esta misma técnica de extracción, encontrando que la composición del disolvente hidroetanólico fue el factor con mayor influencia en el proceso. En su estudio, la máxima recuperación de polifenoles en el extracto líquido (3.61 mg de ácidos fenólicos/100 g de cáscara) se obtuvo con una composición 50% (v/v) de etanol, una relación disolvente/cáscara de 45 mL/g y una temperatura de 80 °C, condiciones que también condujeron a un rendimiento global elevado ($43.74 \pm 0.97\%$). En el presente trabajo, se obtuvo un rendimiento similar (38.21%) en la corrida 6, correspondiente al mayor valor alcanzado dentro del diseño experimental. Este comportamiento sugiere que, en ambos estudios, la temperatura desempeñó un papel determinante en la maximización del rendimiento. Sin embargo, a diferencia de lo reportado por Costa et al., donde la composición del disolvente fue el factor predominante, en este estudio no se identificó dicha variable como la más influyente. Cabe destacar que ambos trabajos analizaron conjuntos de variables diferentes y emplearon materia prima de variedades distintas, aspectos que pueden explicar en gran medida las discrepancias observadas.

A esas condiciones, Costa et al. también reportaron una alta actividad antioxidante (57.75% por DPPH y $82.62 \pm 1.36\%$ por FRAP) y un contenido total de polifenoles (TPC) de 81.26 ± 1.27 mg GAE/g de extracto. En este trabajo, la mayor AC se obtuvo en la corrida #10 (740.48 μ mol TE/DEg). Es importante resaltar que, aunque ambos estudios comparten similitudes metodológicas, la capacidad antioxidante en el presente trabajo fue determinada mediante el ensayo ORAC, el cual evalúa la capacidad de los compuestos para neutralizar radicales libres mediante la donación de un átomo de

hidrógeno, replicando de manera más fiel los mecanismos de acción antioxidante en sistemas biológicos. En cambio, los métodos DPPH y FRAP sólo evalúan reacciones de transferencia electrónica, lo que no representa completamente la actividad antioxidante real. Por tanto, los resultados obtenidos por ORAC constituyen una valoración más completa y confiable de la capacidad antioxidante del extracto estudiado, y no son directamente comparables con los reportados por DPPH y FRAP. No obstante, de forma general, ambos resultados reflejan la presencia significativa de compuestos con alta capacidad antioxidante en los extractos de CH obtenidos por PLE.

2.4. Mejores condiciones de operación para el proceso PLE

Se utilizó el perfilador de predicción generado en el software JMP 18 (ver Figura D2) para maximizar la deseabilidad global y encontrar las mejores condiciones del proceso. A partir de este análisis, se determinó que las mejores condiciones de extracción son: temperatura de 60.7 °C, presión de 2500 psi, concentración de etanol del 100% y tamaño de partícula grande. Sin embargo, dado que la presión no resultó ser un factor significativo dentro del modelo, se decidió operar a 1750 psi, valor que reduce los requerimientos energéticos sin afectar el desempeño del proceso. La Tabla 6 presenta las predicciones del modelo junto con la deseabilidad alcanzada y los respectivos intervalos de confianza para cada variable de respuesta bajo las condiciones óptimas identificadas, lo que permite evaluar la precisión y confiabilidad del modelo en la estimación del comportamiento del sistema. Los resultados experimentales obtenidos bajo estas condiciones mostraron un rendimiento de extracción del 40.72%, valor muy cercano al estimado por el modelo (40.74%), lo que confirma la precisión de la predicción.

Tabla 6. Predicción e intervalo de confianza para las variables de respuesta a las mejores condiciones de operación.

Variable de respuesta	Unidades	Predicción	Extremo inferior de IC	Extremo superior de IC	Deseabilidad
Y	%	40.74	40.17	41.3	0.99
AC	μmol Teq /g DE	774.79	599.93	949.65	

Con base en los resultados obtenidos, la Figura 3 presenta algunas de las superficies de respuesta representativas para el rendimiento y la capacidad antioxidante, correspondientes a condiciones en las que la presión y el tamaño de partícula se mantuvieron constantes; deben comprenderse como una selección ilustrativa, ya que pueden generarse otras superficies al fijar distintas combinaciones de

variables. En la Figura 3a se observa que tanto la temperatura como la proporción de etanol ejercen un efecto positivo sobre el rendimiento, produciendo una tendencia ascendente en gran parte del espacio experimental. El incremento en la respuesta es especialmente marcado hacia mayores fracciones de etanol, lo que indica que la presencia de cosolvente alcohólico mejora la solubilidad de los compuestos objetivo. De forma paralela, el aumento de la temperatura favorece la difusión y reduce la viscosidad, potenciando la transferencia de masa durante la extracción. Dentro del rango evaluado no se detecta un máximo local ni una caída subsecuente del rendimiento; por el contrario, los datos sugieren que la sinergia entre temperaturas relativamente altas y una mayor proporción de etanol continúa incrementando la eficiencia extractiva en las condiciones estudiadas, en línea con reportes previos sobre extracción con solventes presurizados [27].

El espacio asociado a la capacidad antioxidante muestra una tendencia similar, con un incremento de la respuesta hasta un punto óptimo. Este comportamiento se atribuye a que temperaturas moderadas facilitan la liberación y solubilización de compuestos fenólicos con alta actividad antioxidante, mientras que temperaturas más elevadas pueden inducir la degradación o transformación estructural de dichos compuestos [28], reduciendo su capacidad de neutralizar radicales libres. El aumento de la proporción de etanol también potencia la extracción de compuestos polares responsables de la actividad antioxidante.

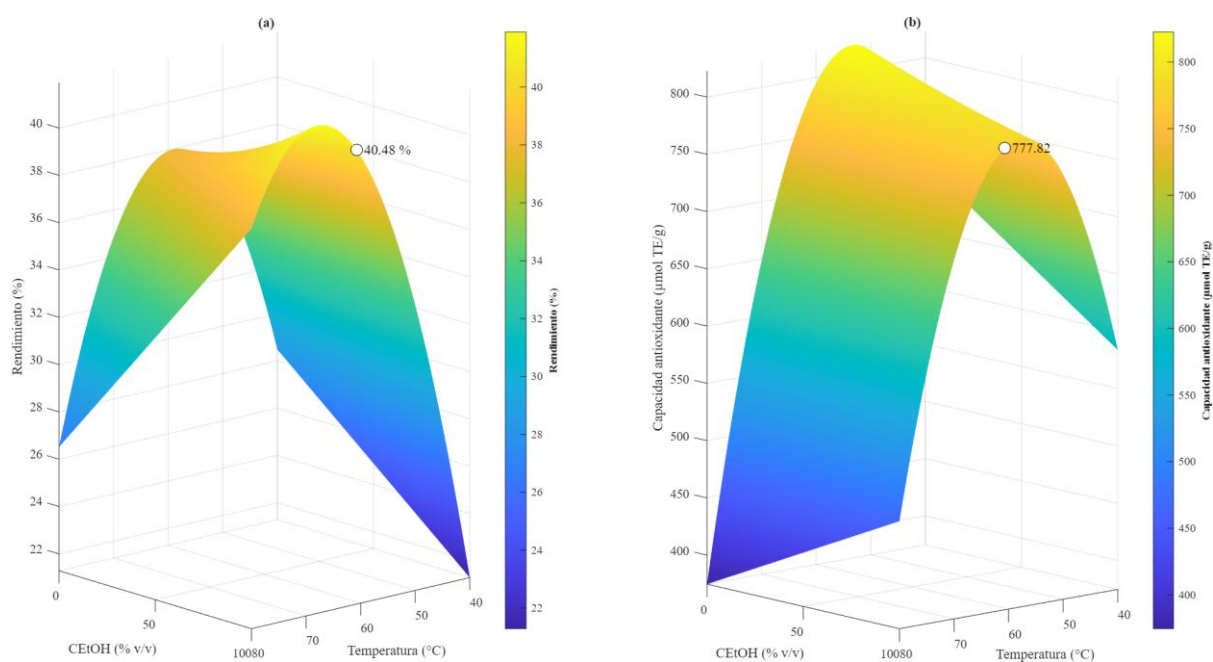


Figura 4. Superficies de respuesta del rendimiento (Y) (a) y la capacidad antioxidante (AC) (b), calculadas bajo condiciones constantes de presión (1750 psi) y tamaño de partícula (1335 μm), incluyendo los puntos óptimos estimados mediante el perfilador de JMP.

La comparación entre ambas superficies revela una coincidencia en la forma y posición de sus zonas óptimas, lo que sugiere que los factores que maximizan el rendimiento global también promueven la obtención de compuestos con elevada capacidad antioxidante. Esto indica que los componentes mayoritarios del extracto contribuyen de manera directa tanto al incremento del rendimiento como a la actividad antioxidante. Los resultados obtenidos concuerdan con las tendencias reportadas por Sai-Ut et al. [29], quienes también observaron un incremento del rendimiento y la capacidad antioxidante con el aumento de la temperatura y la concentración de etanol hasta un punto máximo, seguido de una disminución a valores más altos. Sin embargo, en el presente estudio dicho comportamiento se manifiesta a temperaturas significativamente menores ($\approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo que puede atribuirse a las presiones superiores empleadas (1000–2500 psi), las cuales mantienen la densidad del solvente y favorecen la solubilización de los compuestos fenólicos. Estos resultados sugieren que condiciones de extracción más suaves pueden ser igualmente efectivas, reduciendo el riesgo de degradación térmica y mejorando la sostenibilidad del proceso.

2.5. Análisis preliminar de la aplicabilidad del extracto

2.5.1. Compuestos valiosos presentes en la cáscara de café

La CH ha demostrado ser una fuente rica en metabolitos secundarios bioactivos, como cafeína, taninos, ácidos clorogénicos y otros compuestos fenólicos para los dos tipos de extracción. Estos compuestos exhiben diversas actividades biológicas, entre ellas propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias y aleloquímicas [30]. La Tabla 7 presenta la composición fenólica del extracto seco reportada por Costa et al., obtenida bajo condiciones óptimas de PLE (temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, una relación disolvente:cáscara de 45 mL g^{-1} y un solvente hidroetanólico al 50% de etanol). Bajo estas condiciones, el extracto de CH obtenido mediante PLE mostró la presencia de diversos ácidos fenólicos y flavonoides, siendo los principales componentes el ácido gálico ($9.49\text{ mg/g}_{\text{extracto}}$) y el ácido clorogénico ($1.01\text{ mg/g}_{\text{extracto}}$) [26].

Murthy y Naidu encontraron el ácido clorogénico como el compuesto más abundante en la pulpa de café y la cáscara de la cereza [31]. En el ámbito alimentario, los extractos ricos en ácido clorogénico obtenidos por PLE se emplean en la elaboración de aceites funcionales, la fortificación antioxidante de cereales y productos de panadería, así como en la formulación de suplementos dietéticos. Esta tecnología de extracción, al no requerir disolventes tóxicos y permitir la obtención de compuestos bioactivos estables, favorece la producción de ingredientes de etiqueta limpia orientados a consumidores conscientes de la salud [32].

Cuando el CO₂ se presuriza por encima de su punto crítico, actúa como un disolvente selectivo para compuestos como la cafeína, el ácido clorogénico, los diterpenos, los tocoferoles y los aceites esenciales [32]. El componente principal que comprende el extracto de aceite de CH obtenido mediante SC-CO₂ es ácido oleico, constituye el componente mayoritario, representando aproximadamente el 65 % de la composición total del extracto [33]. Estos extractos presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, lo que los hace potencialmente útiles en el desarrollo de alimentos funcionales, suplementos nutracéuticos y conservantes naturales [32].

Tabla 7. Composición fenólica del extracto seco obtenido bajo condiciones máximas de extracción (80 °C, relación disolvente:cáscara de 45 mL g⁻¹ y 50% de etanol en el disolvente hidroetanólico).

Reproducida de Costa et al. [26]

Compuesto	Concentración (mg/g _{extracto})
Ácido gálico	9.49 ± 0.08
Ácido trans-caféico	0.01 ± <0.001
Ácido clorogénico	1.01 ± 0.02
Ácido <i>p</i> -cumárico	0.01 ± <0.001
Ácido vainílico	nd
Ácido 4-hidroxibenzoico	0.04 ± <0.001
Ácido salicílico	nd
Ácido sinápico	nd
Ácido sirínico	0.03 ± <0.001
Ácido trans-ferúlico	nd
Quercetina	nd
nd: no detectado.	

2.5.1.1. Compuestos fenólicos

Los ácidos clorogénicos, que corresponden a ésteres formados entre ácidos hidroxicinámicos y ácido quínico, se han relacionado con múltiples beneficios para la salud, entre ellos una reducción significativa del riesgo de desarrollar diabetes tipo II. En los últimos años, diversos estudios han destacado su papel en la regulación del metabolismo de azúcares y lípidos, así como sus efectos

antioxidantes, antidiabéticos y antiinflamatorios [32]. Además, se ha demostrado que el ácido clorogénico, uno de los polifenoles más abundantes en frutas y subproductos vegetales, presenta una notable capacidad antioxidante tanto in vivo como in vitro [34].

Los compuestos fenólicos son excelentes candidatos para la prevención de los efectos nocivos de la sobre la piel. Más específicamente, los flavonoides tienen potencial de fotoprotección debido a su capacidad de absorción de UV, capacidad de actuar como antioxidantes y agentes antiinflamatorios e inmunomoduladores [35].

2.5.1.2. Cafeína

La cafeína es un ingrediente ampliamente utilizado en las formulaciones cosméticas para el cuidado de la piel, debido a su capacidad para estimular la microcirculación, reducir la inflamación y ejercer efectos anticelulíticos [32]. Además, como antagonista del receptor de adenosina, la cafeína estimula el sistema nervioso central, incrementando el estado de alerta, la concentración y la capacidad cognitiva, al tiempo que reduce la fatiga y mejora el rendimiento físico cuando se consume en cantidades moderadas. En la actualidad, el café constituye la principal fuente natural de cafeína [36].

La presencia de estos compuestos bioactivos resalta el potencial del extracto de la CH para su aprovechamiento en diversas aplicaciones, tales como el desarrollo de aditivos alimentarios, productos nutraceuticos, farmacéuticos y cosméticos, lo que ha impulsado el interés en la implementación de técnicas de extracción verdes para el aislamiento de dichos compuestos [32].

2.5.2. Análisis del mercado cosmético global y nacional

En los últimos años, se ha evidenciado un creciente interés en los compuestos fenólicos debido a sus reconocidos beneficios para la salud y su amplia aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. Diversos estudios han demostrado que los subproductos del café, como la CH, constituyen fuentes naturales valiosas de compuestos fenólicos con alto potencial antioxidante [37]. Los antioxidantes naturales desempeñan un papel esencial en la neutralización del estrés oxidativo, proceso asociado con el desarrollo de enfermedades crónicas como las cardiovasculares, la diabetes y los trastornos neurodegenerativos [32]. Por ello, existe una oportunidad creciente de mercado para el aprovechamiento de extractos ricos en antioxidantes provenientes de residuos del café, en el marco de las tendencias globales hacia productos naturales, sostenibles y funcionales.

En la actualidad, se ha evidenciado un aumento significativo en la investigación y la demanda de ingredientes naturales y de origen vegetal dentro de la industria cosmeceútica. El término

cosmécuticos, resultado de la combinación de las palabras cosméticos y farmacéuticos, hace referencia a productos que además de mejorar la apariencia, aportan beneficios terapéuticos, como el tratamiento de afecciones cutáneas o la prevención del envejecimiento prematuro [38]. Actualmente, la industria cosmética genera alrededor de 445 mil millones de dólares en ventas anuales, de los cuales Japón representa el mayor valor de mercado, con aproximadamente 7 mil millones de dólares, seguido por Estados Unidos, con cerca de 6 mil millones de dólares, y la Unión Europea, con valores entre 3 y 5 mil millones de dólares, lo que la convierte en un sector altamente competitivo y atractivo [39]. En 2024, el mercado colombiano de productos cosméticos y de cuidado personal cerró con un valor estimado en US\$2,900 millones, lo que significó un crecimiento del 4.6% respecto al año anterior. Las proyecciones indican un crecimiento anual del 8.24% en los próximos cinco años, lo que subraya la creciente demanda de productos de belleza y cuidado personal [40].

Debido a este crecimiento sostenido del sector cosmético, tanto a nivel nacional como internacional, se propone la aplicabilidad tanto del extracto obtenido mediante SC-CO₂ como del obtenido mediante PLE en el desarrollo de formulaciones cosmécuticas. Estos extractos, ricos en compuestos fenólicos, cafeína y ácidos clorogénicos, con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y regenerativas, presentan un alto potencial para su incorporación en productos para la industria cosmética.

2.5.3. Viabilidad de uso de los extractos en productos cosmécuticos

Para evaluar la viabilidad de la incorporación de los extractos obtenidos en el proceso secuencial de extracción SC-CO₂-PLE en productos comerciales, se realizó una revisión de literatura científica mediante ecuaciones de búsqueda estructuradas en la base de datos Scopus, con el propósito de identificar aplicaciones cosméticas previamente reportadas para los compuestos presentes en dichos extractos. Esta exploración documental permitió reconocer líneas de formulación compatibles con las propiedades funcionales del extracto. A continuación, se presentan algunos productos pertenecientes a la industria cosmética en los cuales, según la literatura consultada, se ha reportado el uso de componentes presentes en estos extractos, lo que respalda su viabilidad para este tipo de aplicaciones.

a) Shampoo con cafeína

Diversos estudios se han centrado en la formulación de productos capilares enriquecidos con cafeína, debido a las propiedades bioactivas de este alcaloide que contiene un anillo de purina. La cafeína se utiliza en el tratamiento de la alopecia asociada con la dihidrotestosterona (DHT), dado que actúa como estimulante del crecimiento capilar al contrarrestar los efectos inhibitorios de dicha hormona sobre los folículos pilosos [41]. Además, presenta múltiples beneficios adicionales, como la elongación del tallo capilar, el aumento de la rigidez del cabello, la reducción de la tensión muscular cerca de los folículos

pilosos y la mejora de la microcirculación sanguínea en el cuero cabelludo, lo que favorece la nutrición y fortalecimiento del folículo piloso [42].

En 2010, Bussoletti et al. evaluaron la eficacia cosmética de un shampoo con cafeína en el tratamiento de la alopecia androgenética masculina mediante un estudio clínico de seis meses en hombres de entre 18 y 55 años. Los participantes aplicaron diariamente el producto sobre el cuero cabelludo durante dos minutos antes del enjuague. Los resultados mostraron que, tras tres meses de uso, la caída del cabello disminuyó aproximadamente un 7 %, y después de seis meses, la reducción alcanzó un 14 %, junto con una mejora visible en la fuerza del cabello y en las condiciones del cuero cabelludo. Además, el producto presentó buena tolerancia cutánea y ausencia de efectos adversos, demostrando que la aplicación tópica de cafeína puede fortalecer el cabello y reducir su caída, constituyendo una alternativa cosmética complementaria frente a la alopecia androgenética [43].

De manera similar, Sisto et al. estudiaron el uso de un shampoo con cafeína en 30 mujeres diagnosticadas con efluvio telógeno, un tipo de alopecia inducida por estrés, evaluando su compatibilidad cutánea y eficacia tras su aplicación diaria durante 3 y 6 meses. Los autores reportaron que, después del tratamiento, el 56.7 % de las participantes presentó una reducción del desprendimiento capilar, y al cabo de seis meses, el 66.7 % confirmó que la caída se había “disminuido o normalizado”. Además, se observó una mejora significativa en la resistencia del cabello, buena tolerancia dermatológica y alta aceptación del producto por su calidad cosmética [44].

En 2018, Jung et al. evaluaron los beneficios de la cafeína en la rigidez del cabello. Utilizaron principalmente el 4 % del champú con cafeína y lo aplicaron 10 veces y después midieron las tres variables que incluían el ángulo de rigidez, el peso del cabello y la propiedad de elasticidad del cabello. Los resultados sugieren que la rigidez del cabello se incrementó en un 13.2% y la concentración de enlace mejoró debido a la absorción de cafeína [41].

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estudios previos y las propiedades atribuidas a la cafeína, los extractos obtenidos a partir de la CH mediante SC-CO₂ y PLE representan una alternativa prometedora para su incorporación en formulaciones cosméticas capilares. En el mercado actual existen shampoos de diversas marcas que incluyen cafeína en su composición, por lo tanto, estos extractos podrían emplearse como ingredientes activos en la formulación de este tipo de productos, aportando un valor añadido derivado de su origen natural y sostenible.

b) Crema antienvjecimiento

Algunos de los productos cosméticos con mayor demanda son aquellos destinados a proteger la piel del daño oxidativo. La ANDI (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia) reportó que los productos de protección solar experimentaron un incremento del 12.7 % en sus ventas [40], lo que refleja la creciente conciencia sobre la importancia de proteger la piel de los rayos UV y prevenir el envejecimiento prematuro. Por lo tanto, se investigó la aplicabilidad de los ácidos clorogénicos y la cafeína en la formulación de productos cosméticos con potencial fotoprotector y antienvjecimiento.

En 2020, Girsang et al. evaluaron el efecto del extracto de cafeína de café robusta (*Coffea canephora*), obtenido a partir de granos de café, sobre los niveles de colágeno e hidratación cutánea en ratas Wistar hembra. Se aplicaron cremas con distintas concentraciones del extracto (2.5 %, 5 %, 7.5 % y 10 %) durante cuatro semanas. Los resultados mostraron que la formulación con 10 % de extracto produjo el mayor aumento en colágeno e hidratación de la piel, evidenciando que el extracto de café robusta promueve la regeneración y humectación cutánea, y posee potencial cosmético antienvjecimiento e hidratante [45]. Ese mismo año, Pergolizzi et al. aplicaron un extracto metanólico de café robusta, obtenido a partir de granos de café verde, en la piel de ratas, observando actividad antiinflamatoria y capacidad de eliminación de radicales libres, lo que confirma el potencial cosmético de la cafeína y los extractos de café como agentes antioxidantes, antiinflamatorios y antienvjecimiento [46].

En 2022, Xue et al. demostraron que el ácido clorogénico favorece la síntesis de colágeno tipo I y protege a los fibroblastos dérmicos del daño inducido por radiación UVA. El compuesto contrarrestó la disminución de colágeno y el aumento de enzimas degradadoras (MMP-1 y MMP-3), reactivó la vía TGF- β /Smad2/3, redujo el estrés oxidativo y la apoptosis celular, evidenciando su potencial como agente antienvjecimiento y fotoprotector en formulaciones cosméticas [47].

En 2024, Girsang et al. evaluaron el efecto del ácido clorogénico en fibroblastos dérmicos humanos expuestos a radiación UV, encontrando que este compuesto disminuyó la inflamación y la degradación del colágeno, mientras aumentó la expresión de genes antioxidantes y protectores celulares, especialmente a 25 $\mu\text{g/mL}$. En conjunto, los autores concluyeron que este compuesto presenta una marcada actividad antiedad, favoreciendo la protección cutánea frente al daño oxidativo y al fotoenvjecimiento, lo que respalda su potencial uso en formulaciones cosméticas antienvjecimiento y fotoprotectoras [48].

A partir de los resultados obtenidos, y considerando que la composición de los extractos y el contenido de ácidos clorogénicos están fuertemente influenciados por el disolvente de extracción, las características fisicoquímicas de la materia prima y los parámetros operativos del proceso [35], se

plantea la aplicación de los extractos obtenidos en este estudio en el desarrollo de formulaciones cosméticas. Las propiedades antioxidantes, fotoprotectoras y regeneradoras demostradas por estos extractos los posicionan como ingredientes activos de alto interés para la industria cosmética, especialmente en productos orientados al cuidado cutáneo y capilar. Este potencial de valorización añade pertinencia al análisis económico, dado que los extractos fenólicos estandarizados poseen un elevado valor de mercado y pueden incrementar de manera significativa la rentabilidad del proceso.

2.6. Análisis técnico y financiero preliminar

2.6.1. Escalado del proceso SC-CO₂ y PLE a escala industrial

2.6.1.1. Equipo de extracción

De acuerdo con los datos reportados por la FNC, la producción mensual de café en el departamento del Valle del Cauca se estima en aproximadamente 1359 sacos de 60 kg de café verde [2]. Para efectos del presente estudio, se asumió que el 70% de dicha producción corresponde a la variedad Cenicafé 1, dado su predominio en las zonas cafeteras de la región. Considerando que durante el beneficio del café solo se utiliza una fracción mínima del fruto y que cerca del 95% del peso del fruto fresco se convierte en residuos agroindustriales generados durante las etapas de despulpado, fermentación, lavado y secado [5]. Dentro de estos residuos, se calculó que aproximadamente el 40% corresponde específicamente a la CH. A partir de estas cifras, se estimó una producción anual de 22.82 toneladas de CH, valor a partir del cual se dimensionó el sistema de extracción necesario para su aprovechamiento mediante tecnologías verdes. Se consideró una densidad aparente de partícula de 306 kg/m³ para la CH pretratada, valor determinado experimentalmente en el laboratorio. También, se definió un tiempo operativo de 3 horas por lote, que contempla una hora para el desgrasado mediante SC-CO₂ y dos horas para la PLE.

La jornada de trabajo se estructuró en dos turnos diarios de 8 horas cada uno, lo que representa una operación de 16 horas por día. De acuerdo con este régimen operativo, y para alcanzar una capacidad de procesamiento de 93.92 kg de CH por día, se optó por instalar cuatro extractores, cada uno con un volumen efectivo de 29 litros. La operación se configuró en un esquema semicontinuo, en el cual solo dos extractores operan simultáneamente mientras los otros dos permanecen en etapas de carga, descarga o preparación para el siguiente ciclo. Este modo de operación permite escalar los ciclos de carga, operación y descarga, evitando tiempos muertos y asegurando que siempre haya extractores en funcionamiento. De esta manera, se mantiene un flujo estable de procesamiento durante las 16 horas de operación y se maximiza la utilización del equipo, lo que garantiza alcanzar la capacidad diaria requerida

Entre las consideraciones adicionales tenidas en cuenta para el dimensionamiento de los extractores, se incluyó la relación H/D, la cual se mantuvo en un valor de 5. En cuanto al material de construcción, se seleccionó acero inoxidable tipo AISI 316, debido a su alta resistencia a la corrosión, estabilidad térmica, su compatibilidad con solventes hidroetánicos y condiciones de operación a presión elevada. El diseño mecánico del recipiente se realizó considerando una temperatura máxima de operación de 122 °C, a partir de la cual se determinó un esfuerzo máximo permisible para el material de 1137.68 bar. Con base en estas condiciones y siguiendo los criterios establecidos para recipientes sometidos a presión, se calculó un espesor de pared de 39.6 mm, lo cual clasifica al extractor como un recipiente de pared mediana.

2.6.1.2. Equipo de purificación de extractos

Después del proceso de extracción, los extractos obtenidos mediante PLE contienen además de compuestos fenólicos y otras moléculas bioactivas, una mezcla de componentes adicionales como monosacáridos, polisacáridos y residuos del disolvente empleado durante la extracción. Por esta razón, resulta indispensable incorporar una etapa de separación posterior que permita eliminar el disolvente y purificar los compuestos bioactivos de interés [49]. Estas operaciones representan una fracción considerable de los costos totales asociados a la producción de polifenoles. Además, algunos métodos de separación se basan en cambios de fase que requieren la aplicación de temperatura, lo que puede provocar una disminución en la actividad biológica de los fitoquímicos [49]. Por ello, los equipos seleccionados para la purificación están orientados a técnicas de baja temperatura y alta eficiencia, como la nanofiltración y la evaporación al vacío, que permiten una concentración selectiva sin comprometer la estabilidad química de los metabolitos.

Para la aplicación de polifenoles en productos alimentarios destinados al consumo humano y en formulaciones cosméticas, es indispensable alcanzar niveles de pureza superiores al 95%, ya que únicamente en estas condiciones es posible cumplir con las regulaciones establecidas para alimentos y medicamentos [50–52]. En contraste, cuando los extractos presentan menores grados de pureza o están constituidos por mezclas complejas de diferentes polifenoles, su uso se limita principalmente a la alimentación animal, lo que reduce significativamente su valor comercial [53]. En este sentido, uno de los mayores retos en la recuperación y valorización de polifenoles radica en desarrollar secuencias de separación eficientes que permitan obtener fracciones de alta pureza [54].

En este contexto, los procesos de membrana impulsados por presión, como la microfiltración (MF), la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO), representan sistemas de separación con múltiples ventajas, ya que son procesos atérmicos que no implican cambios de fase ni el uso de agentes químicos. Además, se caracterizan por su alta eficiencia, simplicidad operativa y bajo consumo energético. Estos procesos pueden acoplarse con diferentes técnicas de extracción o

combinarse entre sí en sistemas integrados, con el fin de eliminar el disolvente orgánico, moléculas de gran tamaño (proteínas, polipéptidos) y de pequeño tamaño (sales, azúcares simples), así como otras impurezas, permitiendo obtener mezclas relativamente puras de compuestos bioactivos [49].

Pereira et al. [55], reportaron que la membrana de microfiltración MV020 fue la más efectiva para la eliminación de partículas de mayor tamaño y que su permeado resultó adecuado para la etapa posterior de nanofiltración. No obstante, los autores evidenciaron que el proceso secuencial de micro y nanofiltración MV020–NP010 presenta una eficiencia superior en comparación con los procesos individuales de nanofiltración, además de que el retenido obtenido mediante esta configuración mostró una mayor capacidad antioxidante. En este sentido, se propone emplear un tren de membranas con la secuencia MV020–NP010 para la filtración del extracto, con el objetivo de eliminar los sólidos retenidos y parte del solvente de extracción antes de la evaporación final, optimizando así la pureza y concentración del producto obtenido.

La corriente permeada obtenida del tren de membranas será sometida a una etapa de concentración y recuperación del disolvente mediante un evaporador de corto recorrido (short path). Este proceso consiste en la aplicación de un alto vacío, típicamente dentro del intervalo de 100 a 0.1 Pa [56] para la separación de mezclas líquidas termosensibles o con altos puntos de ebullición. La aplicación del vacío en el espacio de destilación facilita la evaporación de las moléculas del disolvente a bajas temperaturas, reduciendo así los efectos negativos del calor sobre los compuestos bioactivos presentes en el extracto [57]. En consecuencia, el uso de esta tecnología minimiza el riesgo de degradación térmica y preserva la integridad química y funcional de los metabolitos de interés.

2.6.1.3. Proceso integrado

La Figura 5 presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), el cual integra los equipos necesarios para el funcionamiento completo de la planta, considerando tanto el proceso de desgrasado con SC-CO₂ como el proceso de PLE. El sistema contempla tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor, bombas, extractores, separadores y el sistema de separación propuesto, asegurando la adecuada operatividad, control y seguridad del proceso de extracción.

2.6.2. Rentabilidad

En la Tabla 8 se presentan los precios de los equipos requeridos para la planta industrial que integra los procesos de SC-CO₂ y PLE. El capital fijo de inversión (FCI) estimado para la planta industrial fue de \$3,147,146,430 COP. Estos valores fueron cotizados con un proveedor externo y posteriormente ajustados por capacidad y por valor del dinero en el tiempo, empleando las Ecuaciones 3 y 4. Los costos directos, fijos y generales mensuales se detallan en el Anexo F1.

Para definir el precio de venta de los extractos, se realizó una revisión de mercado en diferentes plataformas comerciales de extractos bioactivos, considerando variables como el método de extracción, la pureza, la presentación y la matriz de origen. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el análisis de aplicabilidad de los extractos, el cual permitió identificar su potencial uso en formulaciones cosméticas, y por tanto estimar un valor de mercado coherente con su funcionalidad y perfil composicional. Dado que hasta la fecha no se han reportado precios comerciales para extractos obtenidos de CH mediante el proceso secuencial SC-CO₂-PLE, se tomaron como referencia los precios de extractos derivados de matrices vegetales similares [58,59]. Con base en ello, se estableció un precio de venta estimado de \$16,298 COP/g para el extracto obtenido por SC-CO₂ y de \$17,750 COP/g para el extracto obtenido mediante PLE.

A partir de los costos estimados y los precios de venta definidos, se evaluó la prefactibilidad económica del proceso mediante el cálculo del VPN, la TIR y el WACC. El WACC se calculó en un 20.21%, considerando una estructura de financiamiento compuesta por capital propio y deuda, y se utilizó como tasa de descuento para el análisis financiero. Los resultados mostraron un VPN positivo y una TIR del 62.28%, lo que indica que el proyecto es financieramente viable bajo las condiciones de operación y de mercado consideradas. Estos resultados sugieren que la integración de las tecnologías SC-CO₂ y PLE en una planta industrial para la valorización de la CH representa una alternativa rentable y sostenible, con potencial de escalamiento y aplicación comercial en la producción de extractos bioactivos de alto valor agregado.

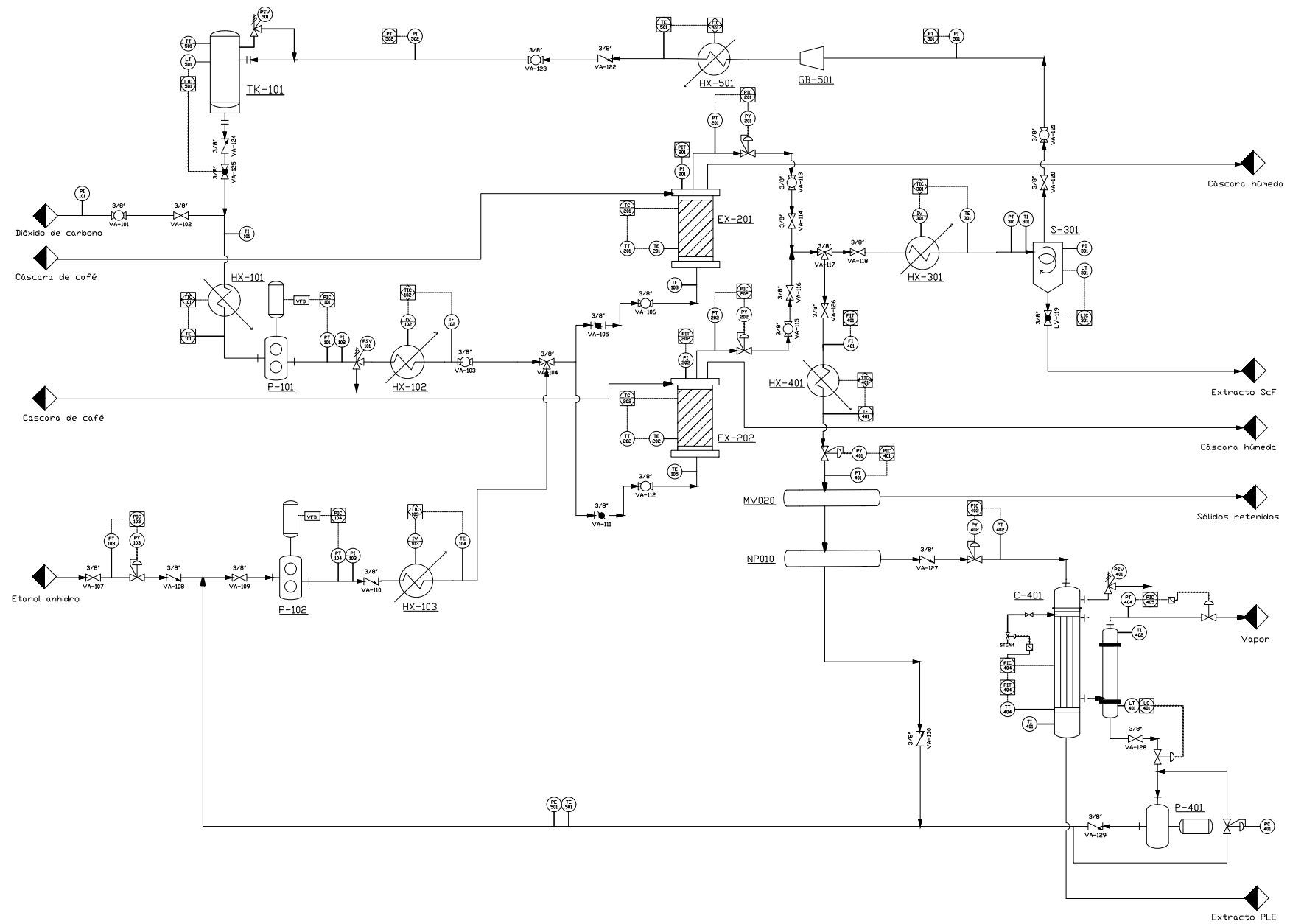


Figura 5. P&ID de proceso secuencial SC-CO₂, PLE y el esquema de separación propuesto

Tabla 8. Equipos presupuestados para la planta industrial del proceso secuencial SC-CO₂ -PLE.

Equipo	Descripción	Precio (COP)	Consumo eléctrico (KWh/ mes)
Extractores	Recipiente fabricado en acero inoxidable 316 Capacidad: 29 L Diámetro: 0.25 m Altura: 0.97 m Cantidad: 4	\$348,894,831	
Resistencia	Resistencia de abrazadera: 3KW SS304 Cantidad: 4	\$5,455,689	3,273
Reservorio	Capacidad: 58 L Diámetro: 0.25 m Altura: 1.23 m	\$3,055,847	
Tanque de almacenamiento	Acero inoxidable 316 Capacidad: 1.6 m ³	\$16,025,786	
Bomba CO ₂	Bomba de triple cabezal, reciprocante, cabezal y válvulas de cheque en SS316 P salida: 5000 psig Tasa de flujo: 1.87 GPM	\$112,769,874	
Bomba EtOH	Bomba de triple cabezal, reciprocante, cabezal y válvulas de cheque en SS316 P salida: 5000 psig Tasa de flujo: 1.74 GPM	\$107,998,489	
Bomba centrífuga	Bomba hidráulica en SS316	\$54,003,249	
Motor bomba	Potencia de 4 KW 220V Cantidad: 2	\$6,401,481	756
Enfriador CO ₂	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 5.4 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Carcasa tubo 6" sch 10 longitud 21 cm.	\$3,545,234	

Calentador CO ₂	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 8.1 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Embebido en bloque de aluminio.	\$4,358,784	6,567
Calentador CO ₂	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 5.6 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Embebido en bloque de aluminio.	\$3,519,040	5,279
Enfriador CO ₂	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 9.3 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Carcasa tubo 6" sch 10 longitud 37 cm.	\$2,385,454	
Intercambiador EtOH	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 4.11 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Embebido en bloque de aluminio.	\$2,918,648	6,283
Condensador EtOH	Serpentín: tubing 3/8 in OD, espesor 0.065 in x 3.17 m (SS-T6-S-065-20), paso 1/4". Carcasa tubo 6" sch 10 longitud 13 cm.	\$3,545,234	
Chiller	Chiller de recirculación Temperatura min: 0°C Flujo agua-etilenglicol: 270 L/min Power: 13.85 KW	\$21,530,714	3,937
Separador CO ₂	Recipiente fabricado en acero inoxidable 304 Capacidad 13 L Diámetro: 0.15 m Altura: 0.74 m	\$17,613,723	

	Amplificador de doble pistón. Pin: 145 a 2900 psig, P salida: 2900 psig, tasa de flujo: 154 L/min Presión de aire: 44 a 116 psig	\$21,450,341	
Gas Booster			
	Estructura, conexiones y tubería en SS316 2 módulos de filtración MV020-NP010 Área total: 13.47 m ²	\$938,452,844	
Membranas			
	Short path Caudal máx: 160 L/h, Presión de operación: 20-20000 Pa T salida < 60 °C	\$873,061,928	35,679
Separador EtOH			
	8 válvulas con actuadores automáticos 4 válvulas de cheque 12 válvulas de aguja válvulas de compuerta y conexiones	\$220,066,198	
Válvulas y accesorios			
	Sensores, transmisores, PLC, variadores, cableado.	\$200,504,758	
Instrumentación, control y sistema eléctrico			
	Swagelok de alta presión 3/8" en SS316 Cantidad: 80 m	\$31,979,255	
Tubería			
	Acero inoxidable 304	\$25,674,390	
Estructura principal			
	6 meses de instalación	\$121,934,640	
Instalación			
Total		\$3,147,146,430	61,774

3. Conclusiones

La extracción secuencial con SC-CO₂ y líquidos presurizados (PLE) demostró ser un sistema eficiente para la recuperación de compuestos bioactivos a partir de la cáscara de café (CH). La mejor corrida experimental registrada dentro del diseño experimental fue la corrida 5, realizada bajo condiciones de 60 °C, 1750 psi, un tamaño de partícula de 713 µm y una concentración de etanol del 50 % (v/v), en la cual se alcanzó una capacidad antioxidante de 678.51 µmol TE/g DE y un rendimiento del 31.74 %. A

partir del análisis estadístico de deseabilidad global, se determinó que las condiciones óptimas de extracción son 60 °C, 1750 psi, 1335 µm y etanol al 100 % (v/v), bajo las cuales se logró un rendimiento de 40.72%.

El estudio de aplicabilidad de los extractos evidenció su alto valor funcional y relevancia industrial, debido a su riqueza en compuestos fenólicos, cafeína y ácidos clorogénicos. Estos compuestos presentan propiedades antioxidantes, estimulantes y protectoras frente al estrés oxidativo, respaldadas por numerosos estudios científicos que demuestran su eficacia en la mejora de la salud capilar y cutánea, así como su potencial para prevenir el daño celular en formulaciones cosméticas. De esta manera, el proceso contribuye significativamente a la valorización sostenible de las cáscaras de café, transformando un subproducto de bajo valor en ingredientes funcionales de alto valor agregado y generando un impacto positivo en la economía circular de la industria cafetera.

El diseño preliminar de la planta industrial, que integra los procesos de SC-CO₂ y PLE, permitió determinar la prefactibilidad técnica y financiera del escalamiento. Los resultados del análisis financiero mostraron que la inversión (\$3,147,146,430 COP) podría recuperarse en aproximadamente dos años, con una TIR del 62.28 % y un VPN positivo, confirmando la prefactibilidad financiera del proceso. En conjunto, estos hallazgos evidencian el alto potencial de los extractos para su implementación industrial, promoviendo tanto la innovación tecnológica como la sostenibilidad en la valorización de residuos agroindustriales.

4. Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda:

- Implementar un sistema de enfriamiento en la zona de salida del sistema, que permita mantener la temperatura del fluido dentro de rangos seguros al momento de la descarga.
- Implementar un sistema de control de presión en la válvula de salida del sistema, para asegurar una operación continua y controlada, minimizando variaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso de extracción.
- Usar mezclas de agua-etanol 60-80%v/v para evaluar la recuperación de compuestos bioactivos de distinta polaridad presentes en la matriz.
- Realizar el análisis de cuantificación de antocianinas monoméricas.
- Implementar análisis por HPLC-DAD o HPLC-MS para identificar compuestos bioactivos presentes en los extractos obtenidos en ambos procesos de extracción.

Agradecimientos.

Expresamos gratitud a nuestras familias, quienes han sido nuestro sostén permanente. Gracias por su amor y por su paciencia infinita. A la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad, por proporcionarnos los recursos académicos, la formación y el entorno que hicieron viable el desarrollo de este proyecto. Agradecemos igualmente al Grupo de Investigación En Valorización de Materiales y Procesos Avanzados de Separación cuyo acompañamiento, guía y aportes técnicos fueron esenciales para el avance y la calidad de esta investigación. Finalmente, queremos dedicar un agradecimiento muy especial al ingeniero químico Alejandro Quintero, por su apoyo constante, su disposición ilimitada para ayudarnos y por acompañarnos incluso en los momentos más exigentes del proceso. Su cercanía, motivación y contribuciones significaron mucho más de lo que estas líneas pueden expresar.

Apéndices - material suplementario

<https://drive.google.com/file/d/13jmym3MIU9fVYw-FRU0bvruxweBf4J9d/view?usp=sharing>

Referencias

- [1] “Informe de gestión FNC 2015-2022,” Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2023.
- [2] “Sostenibilidad - Federación Nacional de Cafeteros - Valle del Cauca”, *Federación Nacional de Cafeteros - Valle del Cauca*, 15-oct-2019. [En línea]. Disponible en: <https://valle.federaciondecafeteros.org/sostenibilidad/>. [Accedido: 17-nov-2025].
- [3] A. K. M. Ospina, “Lo Que Necesitas Saber Sobre La Variedad Cenicafé 1 de Colombia,” *Perfect Daily Grind Español*, 21-Nov-2017.
- [4] “Estadísticas Cafeteras,” *Federación Nacional de Cafeteros - Valle del Cauca*, 30-Nov-2019. [En línea]. Disponible en: <https://valle.federaciondecafeteros.org/estadisticas-cafeteras/>. [Accedido: 05-JUN-2025].
- [5] Y. Fernández-Cortés, K. D. Sotto-Rodríguez, and L. A. Vargas-Marín, “Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados,” *Prod. Limpia*, vol. 15, no. 1, pp. 93–110, 2020.
- [6] A. F. Bondam, D. Diolinda da Silveira, J. Pozzada dos Santos, and J. F. Hoffmann, “Phenolic compounds from coffee by-products: Extraction and application in the food and pharmaceutical industries,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 123, pp. 172–186, 2022.
- [7] T. Belwal *et al.*, “A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, industrial uses and optimization strategies,” *Trends Analyt. Chem.*, vol. 100, pp. 82–102, 2018.

- [8] C. Picot-Allain, M. F. Mahomoodally, G. Ak, and G. Zengin, “Conventional versus green extraction techniques — a comparative perspective,” *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 40, pp. 144–156, 2021.
- [9] L. Barp, A. M. Višnjevec, and S. Moret, “Pressurized liquid extraction: A powerful tool to implement extraction and purification of food contaminants,” *Foods*, vol. 12, no. 10, p. 2017, 2023.
- [10] F. Chemat *et al.*, “Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges,” *Trends Analyt. Chem.*, vol. 118, pp. 248–263, 2019.
- [11] AOAC INTERNATIONAL, *Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL: 3-Volume set*, 22nd ed. New York, NY: Oxford University Press, 2023.
- [12] Y. M. Monroy *et al.*, “Araçáúna (*Psidium myrtilloides*) flour: Sequential extraction with supercritical carbon dioxide and pressurized fluids,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 217, no. 106457, p. 106457, 2025.
- [13] J. Tello, M. Viguera, and L. Calvo, “Extraction of caffeine from Robusta coffee (*Coffea canephora* var. Robusta) husks using supercritical carbon dioxide,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 59, pp. 53–60, 2011.
- [14] A. Mustafa and C. Turner, “Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: A review,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 703, no. 1, pp. 8–18, 2011.
- [15] E. K. Asep, S. Jinap, T. J. Tan, A. R. Russly, S. Harcharan, and S. A. H. Nazimah, “The effects of particle size, fermentation and roasting of cocoa nibs on supercritical fluid extraction of cocoa butter,” *J. Food Eng.*, vol. 85, no. 3, pp. 450–458, 2008.
- [16] E. Attard, “A rapid microtitre plate Folin-Ciocalteu method for the assessment of polyphenols,” *Open Life Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 48–53, 2013.
- [17] R. L. Prior, X. Wu, and K. Schaich, “Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, no. 10, pp. 4290–4302, 2005.
- [18] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya, and W. B. Whiting, *Analysis, synthesis and design of chemical processes*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2022.
- [19] C. Pardo-Castaño, M. Velásquez, and G. Bolaños, “Simple models for supercritical extraction of natural matter,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 97, pp. 165–173, 2015.
- [20] A. M. B. Oliveira *et al.*, “Rapid extraction of xanthohumol, α - and β -acids from spent hops using pressurized liquids and supercritical fluids,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 223, no. 106609, p. 106609, 2025.
- [21] F. W. Maciel-Silva *et al.*, “Pressurized liquid extraction coupled in-line with SPE and on-line with HPLC (PLE-SPExHPLC) for the recovery and purification of anthocyanins from SC-CO₂ semi-defatted Açai (*Euterpe oleracea*),” *Food Res. Int.*, vol. 160, no. 111711, p. 111711, 2022.

- [22] P. Vazquez-Roig and Y. Picó, “Pressurized liquid extraction of organic contaminants in environmental and food samples,” *Trends Analyt. Chem.*, vol. 71, pp. 55–64, 2015.
- [23] M. C. Souza *et al.*, “Simultaneous extraction and separation of compounds from mate (*Ilex paraguariensis*) leaves by pressurized liquid extraction coupled with solid-phase extraction and in-line UV detection,” *Food Chem. (Oxf.)*, vol. 2, no. 100008, p. 100008, 2021.
- [24] R. B. Hoff and T. M. Pizzolato, “Combining extraction and purification steps in sample preparation for environmental matrices: A review of matrix solid phase dispersion (MSPD) and pressurized liquid extraction (PLE) applications,” *Trends Analyt. Chem.*, vol. 109, pp. 83–96, 2018.
- [25] R. Carabias-Martínez, E. Rodríguez-Gonzalo, P. Revilla-Ruiz, and J. Hernández-Méndez, “Pressurized liquid extraction in the analysis of food and biological samples,” *J. Chromatogr. A*, vol. 1089, no. 1–2, pp. 1–17, 2005.
- [26] A. J. N. Costa, N. Stevanato, D. T. Raspe, L. Cardozo-Filho, and C. da Silva, “Valorization of coffee bean husk via pressurized liquid extraction for production of physicochemical extract,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 99, no. 4, pp. 788–796, 2024.
- [27] A. Antony and M. Farid, “Effect of Temperatures on Polyphenols during Extraction,” *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 2107, 2022.
- [28] L. Shi, W. Zhao, Z. Yang, V. Subbiah, y H. A. R. Suleria, “Extraction and characterization of phenolic compounds and their potential antioxidant activities”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 29, núm. 54, pp. 81112–81129, 2022.
- [29] S. Sai-Ut, P. Kingwascharapong, M. A. R. Mazumder, y S. Rawdkuen, “Optimization of ethanolic extraction of phenolic antioxidants from lychee and longan seeds using response surface methodology”, *Foods*, vol. 12, núm. 15, p. 2827, 2023.
- [30] É. M. Dos Santos *et al.*, “Antioxidant, antimicrobial and healing properties of an extract from coffee pulp for the development of a phytocosmetic,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 4453, 2024.
- [31] P. S. Murthy and M. M. Naidu, “Recovery of phenolic antioxidants and functional compounds from coffee industry by-products,” *Food Bioproc. Tech.*, vol. 5, no. 3, pp. 897–903, 2012.
- [32] M. M. Urugo *et al.*, “Green valorization of coffee industry residues: Emerging innovations and their role in sustainable food and feed applications,” *Appl. Food Res.*, vol. 5, no. 2, p. 101181, 2025.
- [33] K. Tamilselvan, S. Sundarajan, S. Ramakrishna, A.-A. A. Amirul, and S. Vigneswari, “Sustainable valorisation of coffee husk into value added product in the context of circular bioeconomy: Exploring potential biomass-based value webs,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 145, pp. 187–202, 2024.
- [34] J. Bouayed, H. Rammal, A. Dicko, C. Younos, and R. Soulimani, “Chlorogenic acid, a polyphenol from *Prunus domestica* (Mirabelle), with coupled anxiolytic and antioxidant effects,” *J. Neurol. Sci.*, vol. 262, no. 1–2, pp. 77–84, 2007.

- [35] J. Marto *et al.*, “The green generation of sunscreens: Using coffee industrial sub-products,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 80, pp. 93–100, 2016.
- [36] B. Cheng, A. Furtado, H. E. Smyth, and R. J. Henry, “Influence of genotype and environment on coffee quality,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 57, pp. 20–30, 2016.
- [37] E. Král, J. L. Rukov, and A. C. Mendes, “Coffee cherry on the top: Disserting valorization of coffee pulp and husk,” *Food Eng. Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 146–162, 2024.
- [38] A. Elbouzidi *et al.*, “Biochemical insights into specialized plant metabolites: Advancing cosmeceutical applications for skin benefits,” *J. Agric. Food Res.*, vol. 19, no. 101651, p. 101651, 2025.
- [39] A. S. Marchev and M. I. Georgiev, “Plant in vitro systems as a sustainable source of active ingredients for cosmeceutical application,” *Molecules*, vol. 25, no. 9, p. 2006, 2020.
- [40] L. L. Díaz, “La industria cosmética crecerá un 6 por ciento este 2025, según proyecciones de la Andi,” *El Tiempo*, 24-Feb-2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/la-industria-cosmetica-crecera-un-6-por-ciento-este-2025-segun-proyecciones-de-la-andi-3429764>. [Accedido: 10-Nov-2025].
- [41] S. K. Mahesh, J. Fathima, and V. G. Veena, “Cosmetic potential of natural products: Industrial applications,” in *Natural Bio-active Compounds*, Singapore: Springer Singapore, pp. 215–250, 2019.
- [42] S. S. Watts, K. Pal, N. Asthana, M. Bhattu, and M. Verma, “Green synthesis by extraction of caffeine for cosmeceutical application: A review,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1305, no. 137733, p. 137733, 2024.
- [43] C. Bussoletti, F. Mastropietro, M. V. Tolaini, and L. Celleno, “Use of a caffeine shampoo for the treatment of male androgenetic alopecia,” *Journal of Applied Cosmetology*, vol. 28, no. 4, 2010.
- [44] T. Sisto, C. Bussoletti, and L. Celleno, “Role of a caffeine shampoo in cosmetic management of telogen effluvium,” vol. 31, pp. 3–4, 2013.
- [45] L. C. Girsang, E. Fachrial, and I. N. E. Lister, “Effectiveness test of Robusta coffee (*Coffea cenephora*) extract from North Sumatra in collagen and hydration skin level of female Wistar *Rattus norvegicus*,” *American Scientific Research Journal for Engineering Technology and Sciences (ASRJETS)*, vol. 65, no. 1, pp. 108–115, 2020.
- [46] S. Pergolizzi *et al.*, “Evaluation of antioxidant and anti-inflammatory activity of green coffee beans methanolic extract in rat skin,” *Nat. Prod. Res.*, vol. 34, no. 11, pp. 1535–1541, 2020.
- [47] N. Xue, Y. Liu, J. Jin, M. Ji, and X. Chen, “Chlorogenic acid prevents UVA-induced skin photoaging through regulating collagen metabolism and apoptosis in human dermal fibroblasts,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 13, p. 6941, 2022.

- [48] E. Girsang *et al.*, “Antiaging properties of chlorogenic acid through protein and gene biomarkers in human skin fibroblast cells as photoaging model,” *Res. Pharm. Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 746–753, 2024.
- [49] A. Cassano, C. Conidi, R. Ruby-Figueroa, and R. Castro-Muñoz, “Nanofiltration and tight ultrafiltration membranes for the recovery of polyphenols from Agro-food by-products,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, no. 2, p. 351, 2018.
- [50] P. Patanè *et al.*, “Polyphenols and functional foods from the regulatory viewpoint,” *J. AOAC Int.*, vol. 102, no. 5, pp. 1373–1377, 2019.
- [51] Zicari, G., Carraro, E., & Bonetta, S. (2007). The Regulation (EC) N. 1924/2006 of the European Parliament and of the Council of the 20 december 2006 on nutrition and health claims made no foods. *Progress in Nutrition*, 9, 264-273.
- [52] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), “Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to polyphenols in olive and protection of LDL particles from oxidative damage (ID 1333, 1638, 1639, 1696, 2865), maintenance of normal blood HDL cholesterol concentrations (ID 1639), mainte: Polyphenols in olive related health claims,” *EFSA J.*, vol. 9, no. 4, p. 2033, 2011. *EFSA journal*, 9(4), 2033.
- [53] A. Brenes, A. Viveros, S. Chamorro, and I. Arija, “Use of polyphenol-rich grape by-products in monogastric nutrition. A review,” *Anim. Feed Sci. Technol.*, vol. 211, pp. 1–17, 2016.
- [54] P. Tapia-Quirós *et al.*, “Integration of nanofiltration and reverse osmosis technologies in polyphenols recovery schemes from winery and Olive mill wastes by aqueous-based processing,” *Membranes (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 339, 2022.
- [55] D. Tamires Vitor Pereira *et al.*, “Concentration of bioactive compounds from grape marc using pressurized liquid extraction followed by integrated membrane processes,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 250, no. 117206, p. 117206, 2020.
- [56] S. S. Mathiasen, Z. Guo, A. M. Fritzen, B. Kiens, M. Kleinert, and L. Wiking, “Physical properties and stability of milk fat retentate fraction from short-path distillation,” *Int. Dairy J.*, vol. 169, no. 106310, p. 106310, 2025.
- [57] J. A. García-Fajardo *et al.*, “Separation of D-Limonene and other oxygenated compounds from orange essential oil by molecular distillation and fractional distillation with a wiped film evaporator,” *Processes (Basel)*, vol. 11, no. 4, p. 991, 2023.
- [58] “Coffee bean CO2 - organic,” *Edenbotanicals.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.edenbotanicals.com/coffee-bean-co2-organic.html>. [Accedido: 05-OCT-2025].
- [59] “Bulk Naturals,” *Bulk Naturals*. [Online]. Available: <https://www.bulknaturalswholesale.com/>. [Accessed: 05-OCT-2025].