

Efecto de las Condiciones de Extracción Sólido-Líquido sobre el Rendimiento y la Calidad de
Polifenoles de la Fibra de Açaí

Daniza Fandiño Buitrago y Sebastián Gómez Jiménez

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Luis Javier López Giraldo

Dr. Química Bioquímica y Ciencia de Alimentos

Codirectora

Astrid Natalia González Morales

Ing. Química

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

*A mi madre, Teresa, mi mayor inspiración, por su amor incondicional, su fortaleza y por
creer en mí incluso cuando yo dudaba.*

*A mi tía Lupe, por su nobleza, su bondad y consentirme como solo ella sabía hacerlo;
te llevo siempre conmigo.*

*A mis amigos, por siempre estar, por las conversaciones interminables, las risas sinceras
y los recuerdos que me acompañan.*

A Balibei, por ser refugio en los días difíciles y alegría constante en los buenos.

*A veces me pregunto... ¿cuál es el sentido de todo esto? Después paso tiempo con las
personas que amo y, por un breve momento, lo entiendo.*

- **Daniza**

Esta tesis la dedico, en primer lugar, a mis papás, por su amor, guía y apoyo incondicional.

*A mi hermano, por su alegría y compañía constante; a mis nonos, por ser mi eterno segundo
hogar; y, finalmente, a mis amigos, quienes a lo largo de los años han decidido recorrer este
camino junto a mí, llenándolo de colores y calidez.*

Para ustedes, que fueron, son y serán la luz que guíe mis pasos.

- **Sebastián**

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por ser el pilar de mi formación académica y social. A la Escuela de Ingeniería Química, por ser mi paradigma de aprendizaje. Al Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CICTA) y a todos los docentes que contribuyeron en mi formación. A mi director, Luis Javier López Giraldo, por ser guía y apoyo en este proceso. A mi codirectora, Natalia González Morales, por los consejos, la paciencia y todas las risas.

A mi madre, Teresa, a quien admiro con cada parte de mi ser; gracias por creer en mí, apoyarme y amarme, todo lo que fui, todo lo que soy y todo lo que seré te lo debo a ti. A mi tía Lupe, aunque ya no estés aquí, te siento cerca; estás en cada gesto de amor que hay en mí. A Balibei, por su cálida compañía y por cada momento de calma que me regala.

A mi amigo y compañero, Sebastián, quien me ha comprendido, aconsejado y acompañado en cada paso; has sido la mejor compañía que pude tener en este proceso. A Gaby, David y Karito, por ser ese refugio al que siempre puedo llegar; vernos crecer ha sido una de las mayores fortunas de mi vida. A Zazu, Andrea, Henao y Almeida, por ser la mayor fuente de alegría. A Vale y Myriam, por inspirarme e impulsarme a ser mejor. A Iván, Lau y Jeff, por cada momento de complicidad. Todos ustedes son mi concepto de amistad, como dicen Cato y Paco; si saltan de un puente, yo los sigo.

Este logro lleva un poco de cada uno de ustedes, gracias por todo.

- **Daniza Fandiño Buitrago**

Cada agradecimiento que hoy doy nace del corazón y, por tanto, del cariño que les tengo.

En primer lugar, agradezco a Dios; solo Él sabe su importancia en mi vida.

Al grupo de investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CICTA). A mi codirectora, Natalia González, por sus enseñanzas, el constante acompañamiento y la paciencia durante toda la tesis. A mi director, Luis Javier López por el nuevo conocimiento y aprendizaje que me ofreció.

A mi familia, Zoila, Luis Carlos y Gabrielito, por su amor, enseñanzas y constante entrega, con los que formaron a un hijo y hermano, que hoy triunfa gracias a ustedes.

A mis muchos amigos, Andrea, Zazu, Henao, Almeida, Iván, Gaby, David, Karito, Vale y Myriam, a quienes conocí durante este lindo proceso. Siempre estuvieron presentes en los momentos lindos y no tan lindos, logrando sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba. A todos los llevo en mi corazón.

A Jekira, quien después de 11 años, sigue presente, dispuesta a escuchar todas mis chocoaventuras y aconsejarme de la mejor forma. Gracias por enseñarme que la amistad trasciende tiempo y distancias.

A Daniza, mi compañera de tesis y la mejor amiga que pude tener en esta etapa. Gracias por la compañía, la confianza, las risas y por ser el verbo *to be*. Este es el principio de muchos más éxitos, ingeniera.

Finalmente, a Sebastián, por creer que podía lograrlo y hacerlo posible.

- **Sebastián Gómez Jiménez**

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Estado del Arte.....	16
3. Descripción Metodológica	19
3.1 Fase 1. Determinación del Método de Extracción, Temperatura y Tiempo con Mayor Rendimiento.....	19
3.1.1 Preparación de la Muestra.....	20
3.1.2 Pretratamiento – Con/Sin Desengrasar	20
3.1.3 Extracción Asistida por Ultrasonido (UAE).....	21
3.1.4 Extracción Sólido-Líquido.....	21
3.1.5 Caracterización de los Extractos Polifenólicos.....	21
3.1.6 Ajuste de Parámetros Cinéticos	22
3.1.7 Análisis Estadístico.....	23
3.2 Fase 2. Selección de la Relación Soluta/Solvente y la Concentración de Solvente con Mayor Rendimiento	23
3.2.1 Preparación de la Muestra.....	23
3.2.2 Extracción Sólido-Líquido.....	23
3.2.3 Caracterización de los Extractos Polifenólicos.....	23
3.2.4 Análisis Estadístico.....	24
3.3 Fase 3. Proposición de Aplicaciones del Extracto de Polifenoles con Mayor Calidad	25

3.3.1	Caracterización Físicoquímica de los Extractos con Mayor Rendimiento	25
3.3.2	Encapsulación del Mejor Extracto	25
3.3.3	Proposición de Aplicaciones del Mejor Extracto.....	26
4.	Resultados.....	27
4.1	Fase 1	27
4.1.1	Pretratamiento – Con/Sin Desengrasar	27
4.1.2	Condiciones de Extracción Asistida por Ultrasonido (UAE)	28
4.1.3	Condiciones de Extracción Sólido-Líquido (Tiempo y Temperatura)	31
4.2	Fase 2	35
4.2.1	Condiciones de Extracción Sólido-Líquido (Relación Soluta/Solvente y Concentración de Solvente)	35
4.2.2	Caracterización de los Extractos Polifenólicos.....	37
4.3	Fase 3	39
4.3.1	Perfil Químico de los Extractos con Mayor Rendimiento	39
4.3.2	Encapsulación del Mejor Extracto	40
4.3.3	Proposición de Aplicaciones del Mejor Extracto.....	41
5.	Conclusiones.....	44
6.	Recomendaciones	45
7.	Referencias bibliográficas.....	46

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelos Matemáticos Sugeridos para la Descripción de la Cinética de Extracción.....	22
Tabla 2. Ajuste de Modelos Cinéticos a Diferentes Temperaturas de Extracción con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v	31
Tabla 3. Contenido Total de Polifenoles, Capacidad Antioxidante y Capacidad Antirradicalaria de los Extractos con Mayor Rendimiento a una Temperatura de 60 °C y un Tiempo de 4 min	38
Tabla 4. Compuestos Fenólicos Predominantes en los Extractos con Mayor Rendimiento Determinados por UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS	39

Lista de Figuras

Figura 1. Partes del Fruto de Açaí	13
Figura 2. Esquema Metodológico	19
Figura 3. Contenido Total de Polifenoles a Diferentes Tiempos y Temperaturas de Ultrasonido con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v	28
Figura 4. Contenido Total de Polifenoles a través del Tiempo de Extracción con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v	31
Figura 5. Cinética de Extracción de Polifenoles Descrita por el Modelo Weibull a Diferentes Temperaturas de Extracción con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v	33
Figura 6. Contenido Total de Polifenoles a Diferentes Relaciones Soluta/Solvente y Concentraciones de Solvente a una Temperatura de 60 °C y un Tiempo de 4 min	36
Figura 7. Comportamiento del Polvo Encapsulado Durante el Secado por Aspersión	40

Lista de Apéndices

Apéndice A. Curvas de Calibración.....	53
Apéndice B. Contenido Total de Polifenoles (CTP).....	54
Apéndice C. Análisis de Varianza ANOVA y Prueba Post Hoc TUKEY (HSD).....	60
Apéndice D. Informe de Resultados Determinación de Compuestos Fenólicos en Muestras Líquidas y/o Sólidas por Cromatografía Líquida de Ultra-alta Resolución con Detector de Masas ORBITRAP, UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS	64
Apéndice E. Método de Decisión Multicriterio mediante Tabla de Ponderación	65

Resumen

Título: Efecto de las condiciones de extracción sólido-líquido sobre el rendimiento y la calidad de polifenoles de la fibra de açai*

Autores: Daniza Fandiño Buitrago, Sebastián Gómez Jiménez**

Palabras Clave: Fibra de açai, *Euterpe precatoria*, polifenoles, extracción sólido-líquido, extracción asistida por ultrasonido, encapsulación.

Descripción:

La fibra de açai (*Euterpe precatoria*) es un subproducto agroindustrial generado durante el procesamiento del fruto; corresponde a la fracción externa fibrosa que recubre el embrión y representa una fuente potencial de compuestos fenólicos con actividad biológica. En este estudio se evaluó el efecto de las condiciones de extracción sólido-líquido sobre el rendimiento y la calidad de los polifenoles obtenidos a partir de la fibra de açai, con el propósito de valorizar este residuo. Se analizaron las variables de temperatura, tiempo, relación soluto/solvente y concentración de solvente, con el fin de maximizar el contenido total de polifenoles (CTP).

Inicialmente, se determinó la combinación de temperatura y tiempo en la que se alcanza el mayor CTP mediante una aproximación cinética a condiciones intermedias (relación soluto/solvente de 1/10 g/mL y concentración de solvente etanol/agua del 65% v/v), ajustando los datos al modelo de Weibull, el cual describió adecuadamente el comportamiento del proceso.

Después, se usó un diseño experimental con el que se obtuvo que las condiciones óptimas fueron 4 minutos, 60 °C, relación soluto/solvente de 1/15 g/mL y etanol al 65% v/v, obteniéndose un CTP de 3,660 mg EAG/g FS, una capacidad antioxidante de 1885 $\mu\text{mol ET/g ML}$ y una capacidad antirradicalaria de 1981 $\mu\text{mol ET/g FS}$. La caracterización mediante UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS permitió identificar compuestos como ácido *p*-hidroxibenzoico, epicatequina y rutina. Adicionalmente, el extracto fue encapsulado, obteniéndose un contenido total de polifenoles de 7,094 mg EAG/g PE. El extracto obtenido posee potencial de aplicación en las industrias alimentaria, dermocosmética y farmacéutica.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Luis Javier López Giraldo. Ingeniero Químico, Ph.D. en Bioquímica y Ciencia de Alimentos.

Codirectora: Astrid Natalia González Morales. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Effect of solid–liquid extraction conditions on the yield and quality of polyphenols from açai fiber*

Authors: Daniza Fandiño Buitrago, Sebastián Gómez Jiménez**

Keywords: Açai fiber, *Euterpe precatoria*, polyphenols, solid–liquid extraction, ultrasound-assisted extraction, encapsulation.

Description:

Açai fiber (*Euterpe precatoria*) is an agro-industrial byproduct generated during fruit processing; it corresponds to the external fibrous fraction that surrounds the seed and represents a potential source of phenolic compounds with biological activity. In this study, the effect of solid–liquid extraction conditions on the yield and quality of polyphenols obtained from açai fiber was evaluated, with the aim of valorizing this residue. The variables analyzed included temperature, time, solute-to-solvent ratio, and solvent concentration, in order to maximize the total polyphenol content (TPC).

Initially, the combination of temperature and time at which the highest TPC is achieved was determined through a kinetic approach under intermediate conditions (solute-to-solvent ratio of 1/10 g/mL and ethanol/water solvent concentration of 65% v/v), fitting the data to the Weibull model, which adequately described the process behavior.

Subsequently, an experimental design was applied, from which the optimal conditions were found to be 4 minutes, 60 °C, a solute-to-solvent ratio of 1/15 g/mL, and 65% v/v ethanol. Under these conditions, a TPC of 3,660 mg GAE/g DM, an antioxidant capacity of 1885 µmol TE/g LS, and an antiradical capacity of 1981 µmol TE/g DM were obtained. Characterization by UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS allowed the identification of compounds such as *p*-hydroxybenzoic acid, epicatechin, and rutin. Additionally, the extract was encapsulated, yielding a total polyphenol content of 7,094 mg GAE/g powder extract. The obtained extract shows potential for application in the food, dermocosmetic, and pharmaceutical industries.

* Bachelor's thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering.

Advisor: Luis Javier López Giraldo. Chemical Engineer, Ph.D. in Biochemistry and Food Science.

Co-advisor: Astrid Natalia González Morales. Chemical Engineer.

Lista de abreviaturas

CTP: Contenido total de polifenoles

DO: Densidad óptica

DPPH: Capacidad antirradicalaria usando el radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo

EAG: Equivalentes de ácido gálico

ET: Equivalentes de Trolox

EY: Rendimiento de encapsulación

FS: Fibra seca

ML: Muestra líquida

O/W: Emulsión aceite en agua

ORAC: Capacidad de absorción de radicales de oxígeno

PE: Polifenoles encapsulados

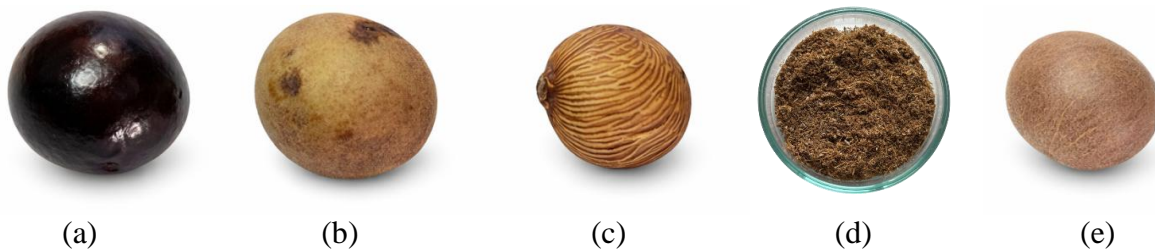
UAE: Extracción asistida por ultrasonido

Introducción

El açaí (*Euterpe precatoria*) es un fruto ampliamente reconocido por su alto contenido de compuestos bioactivos, entre ellos los polifenoles, que se caracterizan por sus propiedades antioxidantes. Colombia es el segundo mayor productor mundial de açaí, con una producción anual de aproximadamente 6.100 toneladas (Partnerships for Forests, 2024). El procesamiento industrial de la pulpa genera una gran cantidad de residuos, que pueden representar hasta el 80% del peso del fruto (Cruz Pessoa et al., 2010). La biomasa residual del açaí está compuesta principalmente por una fracción externa fibrosa que recubre el embrión (c) y por una parte interna sólida (e) (Figura 1). Específicamente, la fibra de açaí corresponde al tegumento fibroso que se extrae de la capa exterior de la semilla, representando aproximadamente el 5,3% del fruto, esta fracción está constituida principalmente por material lignocelulósico (Mendes dos Santos et al., 2025; Pinheiro de Lima et al., 2019).

Figura 1

Partes del Fruto de Açaí. (a) Fruto de açaí entero, (b) fruto despulpado, (c) endocarpio, (d) fibra molida, (e) semilla.



Si bien existe una amplia investigación sobre la extracción y optimización de polifenoles de la pulpa y las semillas de açaí (Barros Dias et al., 2024; Garzón et al., 2017), se han publicado pocos estudios específicos sobre la fibra de este fruto. Esto sugiere que la fibra, lejos de ser

descartada, podría representar una valiosa fuente de compuestos bioactivos con potencial aplicación en diversas industrias.

Uno de los principales desafíos en la valorización de estos compuestos es la eficiencia del proceso de extracción. En este contexto, se han desarrollado diversas técnicas asistidas, como la extracción asistida por ultrasonido (UAE), la extracción mediante fluidos presurizados (PLE) y la extracción asistida por microondas (MAE) (Ramón et al., 2021); sin embargo, la efectividad de estas técnicas depende de la naturaleza de la matriz y de las condiciones de operación empleadas (Alara et al., 2021), por lo que su aplicación debe evaluarse de manera específica para cada material. En el presente estudio se abordó la extracción de polifenoles a partir de la fibra de açaí mediante dos enfoques: la extracción asistida por ultrasonido (UAE) y la extracción sólido-líquido convencional.

La ausencia de estudios detallados sobre la optimización de estas condiciones en la fibra de açaí limita su aprovechamiento y el desarrollo de productos de alto valor agregado en sectores como el alimentario, dermocosmético y farmacéutico. Contar con un proceso de extracción optimizado no sólo permitiría mejorar el rendimiento y la calidad de los polifenoles recuperados, sino también fortalecer la valorización de este subproducto. Asimismo, la caracterización fisicoquímica del extracto (y su encapsulamiento) ofrece una base sólida para proponer aplicaciones potenciales que faciliten su incorporación en formulaciones innovadoras.

En este contexto, la pregunta que orienta el presente estudio es: ¿Cómo influyen las condiciones de extracción sólido-líquido en el rendimiento y la calidad de los polifenoles extraídos de la fibra de açaí, y cuáles podrían ser sus aplicaciones más viables en función de sus propiedades fisicoquímicas?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de las condiciones de extracción sólido-líquido sobre el rendimiento y la calidad de los polifenoles obtenidos a partir de la fibra de açai.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar la temperatura y tiempo donde se alcanza el mayor contenido total de polifenoles (CTP) usando una aproximación cinética a condiciones intermedias de relación soluto/solvente y concentración de solvente.

Seleccionar la mejor relación soluto/solvente y concentración de solvente para maximizar el rendimiento en la extracción de polifenoles.

Proponer aplicaciones del extracto de polifenoles obtenido en las condiciones óptimas de temperatura, tiempo, relación soluto/solvente y concentración de solvente, basándose en su calidad mediante cromatografía líquida acoplada con un detector de masas.

2. Estado del Arte

En la literatura científica, la extracción de compuestos fenólicos del açaí se ha desarrollado principalmente a partir de pulpa liofilizada, constituyéndose como la fracción más estudiada para la optimización de procesos. En contraste, los residuos generados durante el procesamiento del fruto han recibido una atención limitada en términos de valorización para la recuperación de compuestos fenólicos.

A continuación, se presentan estudios relevantes en los que se han establecido condiciones óptimas de operación para la extracción de polifenoles a partir de diferentes fracciones del fruto de açaí, con el propósito de identificar avances, enfoques metodológicos predominantes y vacíos de conocimiento en el área.

El trabajo investigativo realizado por Hanula et al. (2020), usó liofilizado de açaí para realizar un comparativo entre dos métodos de extracción de polifenols: ultrasonido y microondas. Las variables de operación utilizadas fueron una relación soluto/solvente de 1/25 g/mL junto a una relación etanol/agua de 50% v/v. El equipo de ultrasonido empleó una frecuencia de 37 kHz con una amplitud de 100% durante 5, 25 y 45 minutos a una temperatura de 25 °C y 45 °C. El mayor contenido total de polifenoles fue de 35,95 mg EAG/g de açaí liofilizado, éste fue obtenido a una temperatura de 45 °C y un tiempo de extracción de 25 minutos.

De la misma manera, el estudio realizado por Aliaño, (2014) propuso una extracción asistida por ultrasonido a partir de liofilizado de açaí, donde se empleó un diseño de experimento de Box-Behnken de 6 variables (% metanol, temperatura, amplitud del ultrasonido, ciclo, pH y volumen) con una variable de respuesta (composición de compuestos fenólicos totales). Los resultados del diseño de experimentos condujeron a un valor máximo de 260,491 mg EAG/g açaí

liofilizado a una concentración de metanol de 49%, una temperatura de 41 °C, una amplitud de 30% y un tiempo de extracción de 5 min. Se evidenció que el parámetro con mayor influencia fue la concentración de solvente seguido de la temperatura.

Por otra parte, el estudio realizado por Viganó et al. (2022) aplicó un método comparativo para evaluar la extracción de compuestos fenólicos desde subproductos (semillas y fibras) del açaí, utilizando tanto extracción asistida por ultrasonido (UAE) como extracción con líquidos presurizados (PLE). Para la UAE, se utilizó un sistema ultrasónico (200 W, 20 kHz) empleando una mezcla metanol/agua al 80% v/v como solvente, con un tiempo de extracción de 25 minutos a 45 °C, con lo cual obtuvieron 8,6 mg EAG/g de materia prima seca. La extracción por ultrasonido demostró ser una alternativa efectiva a menor temperatura y a condiciones operativas más accesibles.

En el trabajo reportado por Melo et al. (2021) se utilizó como materia prima semillas de açaí para encontrar los compuestos fenólicos presentes en este residuo agroindustrial. Se empleó un Diseño Rotatorio Compuesto Central (CCRD) para determinar los efectos de las variables de concentración de solvente y temperatura sobre la actividad antioxidante. Los autores concluyeron que la mejor relación etanol/agua fue de 57:43 v/v, con una temperatura de 25 °C, al conseguir un CTP de 64,58 mg EAG/g semilla de açaí liofilizada. Estas condiciones se enfocaron en el menor uso de recursos, como solvente y energía, maximizando así la eficiencia en un proceso industrial.

De igual manera, Martins et al. (2020) empleó semilla de açaí para el análisis de sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, donde se separó la semilla de la pulpa y se trituroó la semilla en un molino de cuchillas obteniendo un tamaño menor a 2 mm. Las condiciones de extracción usadas fueron una relación sólida/líquido de 1:10 m/v, donde el solvente usado fue metanol al 100%. Esta extracción se realizó durante 1 hora a 40 °C bajo agitación orbital a 120

rpm. Los resultados obtenidos por ellos indicaron un valor de EC_{50} (concentración de extracto necesaria para reducir el 50% del radical libre DPPH) de 16,95 μg de semilla de açaí /mL de extracto metanólico. Según Martins et al. (2020) estos resultados coinciden con otros reportados en la literatura, donde se confirma la alta capacidad antioxidante de las semillas de açaí.

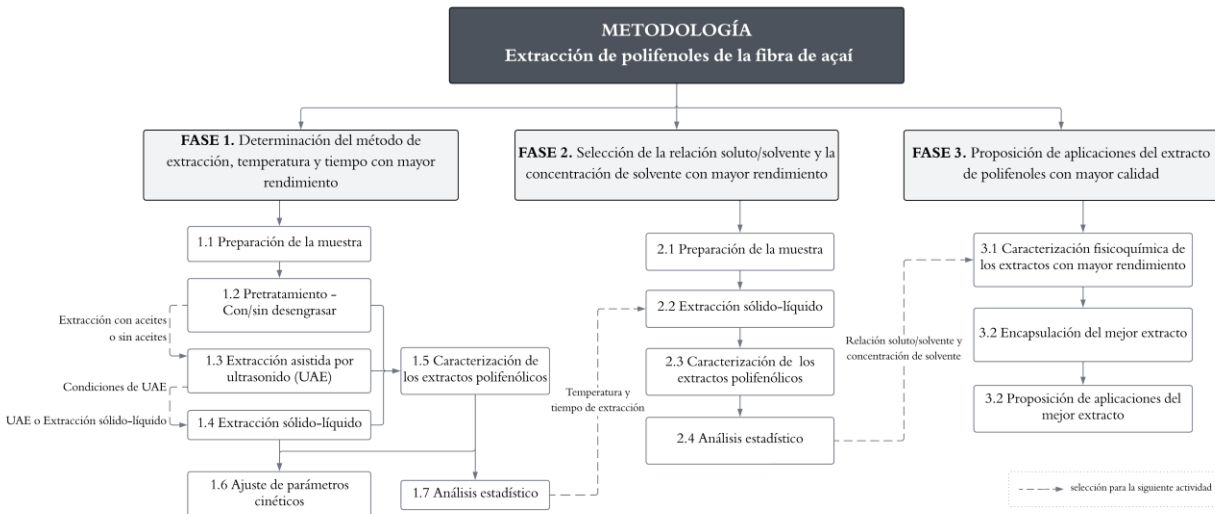
Lo anterior evidencia que la naturaleza de la materia prima empleada (pulpa o semilla), el método de extracción seleccionado y las variables operativas implementadas durante el proceso influyen de manera significativa en el CTP de los extractos obtenidos. Estos resultados subrayan la necesidad de definir y optimizar las condiciones de operación en función de las características específicas de la matriz vegetal utilizada, a fin de mejorar el rendimiento del proceso y la calidad del extracto.

Asimismo, al momento de la realización de este estudio, no se identificaron investigaciones que emplearan exclusivamente la fibra de açaí como materia prima, ni etanol como solvente en la extracción de compuestos fenólicos, destacándose este último por su baja toxicidad, fácil evaporación y su adecuada incorporación en productos alimentarios y farmacéuticos (Da Silva et al., 2021). Esta brecha muestra una oportunidad de investigación orientada al aprovechamiento integral de los subproductos del fruto y a la generación de alternativas sostenibles para su valorización. En este contexto, el presente trabajo de investigación se enfoca en determinar las condiciones óptimas de operación para la extracción de polifenoles a partir de fibra de açaí, evaluando tanto el rendimiento del proceso como la calidad del extracto obtenido.

3. Descripción Metodológica

Figura 2

Esquema Metodológico



3.1 Fase 1. Determinación del Método de Extracción, Temperatura y Tiempo con Mayor Rendimiento

Todas las extracciones de polifenoles (a excepción de la actividad 3.1.4) se realizaron de la siguiente manera: En un espacio oscuro, se inició la extracción añadiendo la cantidad requerida de fibra de açai en una mezcla de etanol desodorizado/agua a 300 rpm a la temperatura, tiempo, relación soluto/solvente y concentración del solvente indicados en cada actividad, utilizando una placa caliente con agitador magnético (C-MAG HS7, IKA, Alemania) y un termopar (ETS-D5, IKA, Alemania). El extracto resultante se centrifugó (Heraeus Megafuge 16 R, Thermo Scientific, EE. UU.; 4000 rpm, 4 °C, 15 min), luego el sobrenadante se filtró al vacío usando un filtro Wattman grado uno (Pico-Hernández et al., 2020). Todos los experimentos fueron realizados por triplicado.

3.1.1 Preparación de la Muestra

El fruto de açai, obtenido de muestras de origen colombiano, fue despulpado de manera manual, donde se separó la fibra junto a la semilla del endocarpio de la fruta, para posteriormente ser secadas en horno de convección a 70°C durante 24 horas. Luego, el material obtenido se procesó en un molino de bolas (Berstorff, Hannover, Alemania), seguidamente se tamizó hasta tamaño de partícula de 2 mm donde se separó la fibra de la semilla. El acceso al material biológico está autorizado mediante el otrosí No. 1 al Contrato Marco de Acceso a los Recursos Genéticos y sus Productos Derivados No. 383 de 2024 con número de expediente RGE-00468 suscrito entre la Universidad Industrial de Santander y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

3.1.2 Pretratamiento – Con/Sin Desengrasar

Con el fin de evaluar el impacto de la presencia de aceites en la extracción de polifenoles, se propusieron los siguientes pretratamientos a condiciones intermedias (ultrasonido a 25 °C por 20 minutos y extracción sólido-líquido a 40 °C por 15 minutos).

Sin desengrasar. Se utilizó directamente la fibra molida.

Desengrasar. 5 g de fibra de açai seca y molida se desengrasó 3 veces con 50 ml de n-hexano usando un baño ultrasónico a 20 kHz (Ultrasonic L.C 30H, Elma, Singen, Alemania; 25 °C, 15 min); la masa resultante se separó por centrifugación (4000 rpm, 25°C, 10 min) y se secó durante la noche hasta obtener un polvo desengrasado (Toro Uribe, 2018).

Este procedimiento se realizó únicamente para verificar si hay diferencias significativas entre desengrasar y no desengrasar.

3.1.3 Extracción Asistida por Ultrasonido (UAE)

Se evaluó la temperatura (5, 25, 45 °C) y tiempo de sonicación (10, 20, 30 min) usando un baño ultrasónico a 20 kHz. Se probaron condiciones intermedias de extracción: relación soluto/solvente 1/10 g/mL, concentración solvente al 65% v/v, tiempo de 15 min y temperatura de 40 °C. Con las mejores condiciones en el baño ultrasónico, se evaluó el efecto de la UAE contra la extracción sólido-líquido convencional (mismas condiciones sin ultrasonido) y se eligió el método más adecuado para la actividad 3.1.4.

3.1.4 Extracción Sólido-Líquido

Inicialmente, se realizaron extracciones a temperaturas de 22, 40 y 60 °C, tomando muestras de 1,5 mL en diferentes intervalos de tiempo (0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30 min). De manera complementaria, se incluyeron ensayos a 4, 8 y 12 °C con el fin de describir de forma más completa el comportamiento cinético del proceso; estos ensayos se llevaron a cabo utilizando una chaqueta de enfriamiento conectada a un baño de circulación de baja temperatura (CCP5-Mini, DLAB Scientific, China). Todas las extracciones se realizaron bajo condiciones intermedias (relación soluto/solvente de 1/10 g/mL y concentración de solvente del 65% v/v). Posteriormente, los extractos obtenidos fueron centrifugados (Prism Air-Cooled Microcentrifuge, Labnet International, EE. UU.) y filtrados (Filtro Millipore de 0,45 µm, Labfil, China).

3.1.5 Caracterización de los Extractos Polifenólicos

Se determinó el CTP en cada muestra mediante el método de Folin-Ciocalteu, siguiendo el procedimiento descrito por Pico-Hernández et al. (2020). La reacción se inició añadiendo 50 µL de la muestra con 1,5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu diluido al 10%

v/v. Después de 5 min almacenado en la oscuridad, se añadió 1,5 mL de carbonato de sodio al 7,5% p/v y se agitó en vortex (LP Vortex Mixer, Thermo Scientific, EE. UU.) durante 10 s, el medio de reacción se mantuvo almacenado en la oscuridad durante 1 h a 25 °C. La densidad óptica (DO) se midió en un espectrofotómetro a 765 nm (Genesys 20, Thermo Scientific-Fisher, Waltham, MA, USA) frente a una mezcla agua/etanol como blanco. Se realizó una curva de calibración de ácido gálico ($R^2= 0,999$) y los resultados del CTP se expresaron como miligramo equivalente de ácido gálico por gramo de fibra seca (mg EAG/g FS) (Apéndice A.1).

3.1.6 Ajuste de Parámetros Cinéticos

Se realizó el ajuste de parámetros cinéticos evaluando modelos reportados en literatura (Cáceres-Roa et al., 2023; Trifković et al., 2015), presentados en la Tabla 1, empleando el algoritmo Levenberg–Marquardt en el software Statistica v.14.0.0.15. Para los modelos de Rakotondramasy y Weibull, el parámetro C_{eq} (Concentración en el equilibrio) se estimó como el promedio de los últimos cuatro puntos experimentales en los que se observó comportamiento de equilibrio.

Tabla 1

Modelos Matemáticos Sugeridos para la Descripción de la Cinética de Extracción

Modelo	Ecuación	Parámetros
Peleg	$CTP = exp(k_1 * t^n)$	k_1, n : constantes de Peleg
Peleg modificado	$CTP = \frac{t}{k_2 + k_3 * t}$	k_2 : inverso de la velocidad de extracción k_3 : inverso de la concentración máxima
Logarítmico	$CTP = A * log(t) + B$	A, B : constantes del modelo logarítmico
Rakotondramasy	$CTP = C_{eq}(1 - exp(-k_4 * t))$	k_4 : constante de velocidad global
Weibull	$CTP = C_{eq}(1 - exp(-(k_5 * t)^{k_6}))$	k_5, k_6 : constantes del modelo Weibull

3.1.7 Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza ANOVA con una prueba post hoc TUKEY (HSD) en el software Statistica v.14.0.0.15, con el objetivo de identificar si hay diferencias significativas entre las variables evaluadas. Este análisis estadístico se llevó a cabo de manera progresiva, conforme se obtenían los resultados de las actividades 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4. El intervalo de confianza de la prueba fue de 95% ($p \leq 0,05$). Finalmente, la muestra que presentó los mejores resultados en estas pruebas fue la que determinó las condiciones de temperatura y tiempo para aplicar en la Fase 2.

3.2 Fase 2. Selección de la Relación Solutivo/Solvente y la Concentración de Solvente con Mayor Rendimiento

3.2.1 Preparación de la Muestra

Se empleó el mismo procedimiento descrito en la actividad 3.1.1.

3.2.2 Extracción Sólido-Líquido

Se empleó un diseño factorial 3^2 donde se evaluaron dos variables independientes: la relación soluto/solvente (1/5, 1/10 y 1/15 g/mL) y la concentración de solvente (50%, 65% y 80% v/v). La variable de respuesta fue el CTP.

3.2.3 Caracterización de los Extractos Polifenólicos

Se siguió el procedimiento descrito en la actividad 3.1.4. Adicionalmente, se determinó la capacidad antioxidante mediante el ensayo de capacidad de atrapamiento de radicales de oxígeno (ORAC), siguiendo la metodología propuesta por Pico-Hernández et al. (2020). Se llenaron microplacas de noventa y seis pozos con 150 μ L de la solución de fluoresceína de trabajo diario ($8,16 \cdot 10^{-5}$ M en tampón fosfato 75 mM, pH 7,4) y 25 μ L de

extracto de polifenoles a concentración conocida. Luego, se incubaron a 37 °C durante 10 min en un lector de microplacas (Fluoroskan Microplate Fluorometer, Thermo Scientific, EE. UU.). La reacción se inició mediante la adición de 25 µL de solución de AAPH (153 mM en tampón fosfato 75 mM, pH 7,4). Luego, el decaimiento de la fluorescencia fue monitoreado cinéticamente cada minuto durante 1 h, utilizando longitudes de onda de emisión y excitación de 485 y 528 nm, respectivamente. Se preparó una curva de calibración con 10-50 µmol Trolox como lo indica la siguiente ecuación.

$$ORAC = \frac{ABC_{muestra} - ABC_{blanco}}{ABC_{Trolox} - ABC_{blanco}} * k * \frac{Molaridad\ del\ Trolox}{Peso\ de\ la\ muestra} \quad (Ec. 1)$$

Donde k es el factor de dilución de la muestra y ABC es el área bajo de la curva de disminución de la fluorescencia de la muestra, el blanco y Trolox. El resultado se reportó en µmol equivalente Trolox por gramo de muestra líquida (µmol ET/g ML).

En complemento, se determinó la capacidad antirradicalaria mediante el método DPPH de los tres extractos con mayor rendimiento, siguiendo el procedimiento descrito por Quiroga Ruiz & Herrera Sánchez (2019). Se mezclaron 100 µL de la muestra seleccionada con 3,9 mL de reactivo DPPH (60 µM) y se dejó reposar en ausencia de luz durante 30 minutos. Posteriormente, se realizó una lectura de absorbancia en un espectrofotómetro a 517 nm. Se realizó una curva de calibración de Trolox ($R^2 = 0,994$) y los resultados se expresaron como miligramo equivalente de Trolox por gramo de fibra seca (mg ET/g FS) (Apéndice A.2).

3.2.4 *Análisis Estadístico*

Se realizó el mismo análisis estadístico expuesto en el inciso 3.1.7.

3.3 Fase 3. Proposición de Aplicaciones del Extracto de Polifenoles con Mayor Calidad

3.3.1 *Caracterización Físicoquímica de los Extractos con Mayor Rendimiento*

Con base en los resultados obtenidos en la Fase 2, se realizó Cromatografía Líquida de Ultra-alta Resolución con Detector de Masas *ORBITRAP* (UHPLC-ESI-*ORBITRAP*-MS) empleando un sistema *Dionex Ultimate 3000* acoplado a un espectrómetro *Exactive Plus Orbitrap* (Thermo Scientific, CA, EE. UU.) con ionización por electronebulización en modo positivo (ESI+) y adquisición *full scan*/EIC a los tres extractos con mayor rendimiento, permitiendo conocer concentración y tipo de polifenoles presentes. Se eligió el mejor extracto mediante el método de decisión multicriterio (tabla de ponderación).

3.3.2 *Encapsulación del Mejor Extracto*

Se rotoevaporó (RE100-Pro, DLAB Scientific, China) el mejor extracto para retirar todo el etanol de la muestra y el extracto concentrado fue encapsulado mediante secado por aspersión (Mini Spray Dryer S-300, BÜCHI Labortechnik AG, Suiza) siguiendo la metodología descrita por González Morales et al. (2025). Para el proceso de encapsulación se empleó goma arábiga como agente encapsulante, preparando una solución a 50 °C bajo agitación constante (1000 rpm, 20 min). A continuación, se incorporó 1 g de extracto polifenólico y se agitó durante 10 min antes de la homogeneización (Ultra-Turrax, IKA-Werke, Alemania; 8000 rpm, 5 min). La relación extracto polifenólico/goma arábiga utilizada fue de 1/3 p/p. El secado por aspersión se llevó a cabo bajo un flujo de gas de secado de 30 m³/h, un flujo de gas de aspersión de 600 L/h y un flujo de alimentación de 4 mL/min, con una temperatura de entrada de 120 °C. Durante el proceso se controló la temperatura de salida, la cual se mantuvo alrededor de 65 °C, mientras que la temperatura

del producto fue cercana a 50 °C. Finalmente, para cuantificar el CTP de las microcápsulas, se rompieron añadiendo 0,1 g de microcápsulas a 1 mL de una solución de citrato de sodio al 10% p/v, seguido de agitación en vórtex durante 15 s y centrifugación (10000 rpm, 20 min). Posteriormente, el sobrenadante se filtró (Filtro Millipore de 0,45 µm, Labfil, Hangzhou, China) y se determinó mediante el método de Folin–Ciocalteu.

Adicionalmente, se determinó el rendimiento de encapsulación utilizando la siguiente ecuación (González Morales et al., 2025).

$$EY(\%) = \left(\frac{W_C}{W_{AE} + W_{EP}} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde W_C es el peso de las microcápsulas, W_{AE} es el peso del agente encapsulante y W_{EP} es el peso del extracto polifenólico.

3.3.3 Proposición de Aplicaciones del Mejor Extracto

Con base en los resultados de las actividades 3.3.1 y 3.3.2 se propusieron posibles aplicaciones del extracto en la industria alimentaria, dermocosmética y farmacéutica, destacando su funcionalidad.

4. Resultados

4.1 Fase 1

4.1.1 *Pretratamiento – Con/Sin Desengrasar*

Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre las muestras sometidas a desengrasado y aquellas procesadas sin esta etapa en la extracción de polifenoles a partir de fibra de açaí. La muestra desengrasada presentó un CTP promedio de $2,662 \pm 0,130$ mg EAG/g FS, mientras que la muestra sin desengrasar alcanzó un valor superior de $3,140 \pm 0,130$ mg EAG/g FS. Este resultado puede atribuirse a que, pese al uso de un solvente no polar como el hexano, se presenta un fenómeno de coextracción asociado a la fracción lipídica de la matriz vegetal. En este contexto, una parte de los polifenoles puede encontrarse retenida o asociada al aceite presente en el material sólido, lo que favorece su arrastre durante los procesos de extracción de la fracción lipídica (Koubaa et al., 2016), aunque el rendimiento de extracción de los solventes no polares es mucho menor que el de los solventes polares (Corona-Jiménez et al., 2016).

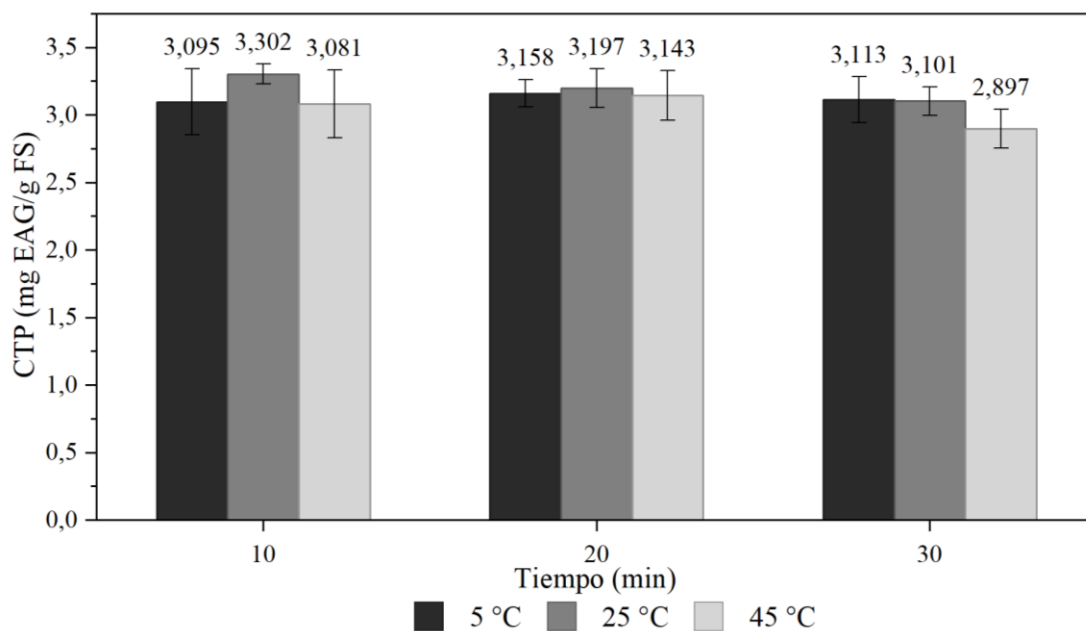
Resultados similares fueron reportados por Spigno & De Faveri (2007), quienes evaluaron el poder antioxidante de extractos obtenidos de tallos de uva y compararon metodologías con y sin pretratamiento con hexano para desengrasarlo. El pretratamiento redujo el contenido total de polifenoles, pasando de un rango de 2,0–2,5 mg EAG/g de materia seca a 1,8–2,2 mg EAG/g de materia seca, y solo produjo una ligera mejora en la pureza del extracto. Por ello, concluyeron que el desengrasado no constituye una etapa útil para incrementar la pureza del extracto fenólico. Considerando lo anterior, se decidió omitir este paso en los experimentos posteriores.

4.1.2 Condiciones de Extracción Asistida por Ultrasonido (UAE)

Durante la evaluación de las condiciones UAE, se encontraron valores de CTP en un rango entre 2,897-3,302 mg EAG/g FS, siendo mayores los encontrados en 20 min a 5 °C, 10 min y 20 min a 25 °C (Figura 3). Esto coincide con lo reportado por Aliaño (2014), quien indica que el mayor CTP se da en los primeros minutos del proceso de ultrasonido. No obstante, este comportamiento no se mantuvo constante como se esperaba, lo cual puede atribuirse a diversas causas.

Figura 3

Contenido Total de Polifenoles a Diferentes Tiempos y Temperaturas de Ultrasonido con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v



En la extracción a 5 °C se esperaban los valores de CTP más bajos, debido a que al realizarse la UAE a bajas temperaturas, no suele presentar una eficiencia alta en comparación con temperaturas más elevadas (Reche et al., 2022). Sin embargo, se

obtuvieron valores superiores a 3 mg EAG/g FS en todos los tiempos evaluados. Los resultados determinan que, dentro del rango evaluado, la temperatura no tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento de extracción ($p > 0,05$). Esto indica que, bajo una frecuencia ultrasónica constante, la variación de la temperatura no fue un factor determinante en el proceso. Este comportamiento es similar al encontrado por Oroian et al. (2020) donde al usar propóleo como materia prima, se encontró una menor influencia de la temperatura comparada con otros factores como la amplitud y la concentración de solvente.

Por otro lado, los valores más altos registrados en esta actividad (3,302 mg EAG/g FS y 3,197 mg EAG/g FS) se obtuvieron a 25 °C, muy cercanos a la temperatura ambiente. Este resultado podría considerarse contradictorio, ya que la extracción de polifenoles asistida por ultrasonido suele verse favorecida por incrementos moderados de temperatura. Por ejemplo, Hanula et al. (2020) reportaron temperaturas de ultrasonido de 45 °C donde se obtuvo un contenido de 35,95 mg EAG/g de açaí liofilizado, mientras que a 25 °C se alcanzaron 34,18 mg EAG/g de açaí liofilizado. Con base en estos resultados, los autores concluyeron que el aumento de la temperatura favorece el incremento del CTP en el extracto final. No obstante, también se debe contemplar la posible degradación de polifenoles al estar expuestos tiempos prolongados a temperaturas elevadas, lo que pudo disminuir el CTP (Muzykiewicz-Szymańska et al., 2024).

Asimismo, se observa en todas las temperaturas evaluadas que, al prolongar el tiempo de ultrasonido más allá de 20 minutos, el CTP disminuye. Esto sugiere que un tiempo de sonicación excesivo puede generar un efecto contrario al esperado, es decir, una reducción del CTP a medida que avanza la extracción.

Al no encontrarse diferencias significativas en los resultados de CTP para tiempo y temperatura de ultrasonicación ($p > 0,05$) se seleccionó una temperatura cercana a la ambiental y el menor tiempo analizado, siendo el caso de 25 °C y 10 min las condiciones elegidas para realizar la comparación del efecto de la UAE contra la extracción sólido-líquido convencional. Al realizar la extracción sólido-líquido convencional (sin aplicación de ultrasonido) bajo condiciones intermedias de operación (40 °C y 15 min de extracción) se obtuvo un valor de CTP de $3,296 \pm 0,314$ mg EAG/g FS el cual se comparó con el mejor resultado obtenido mediante ultrasonido (3,302 mg EAG/g FS).

Aunque la mayoría de los estudios sobre la UAE reportan un efecto positivo en la liberación de polifenoles, en este estudio su aplicación no produjo un aumento significativo en el CTP. Este comportamiento, aunque poco común, sugiere que la eficacia del ultrasonido depende de la estructura de la matriz vegetal y de su respuesta al fenómeno de cavitación acústica. Debido a esto, para algunas matrices vegetales como las hojas de olivo, el ultrasonido puede favorecer significativamente la liberación de compuestos polifenólicos (Rombaut et al., 2020), mientras que en el caso de la fibra de açaí, se puede evidenciar que su efecto puede ser limitado o incluso nulo. Otra explicación podría ser el uso de ultrasonido a alta potencia, que puede generar radicales hidroxilos libres capaces de degradar los polifenoles, especialmente en sistemas con alto contenido de agua (Abdelkebir et al., 2019).

Considerando estas posibles causas, y al no encontrar variaciones estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre ambos tratamientos, se decidió prescindir del pretratamiento con ultrasonido, dado que este implica un mayor consumo energético sin generar un incremento significativo en el contenido total de polifenoles.

4.1.3 Condiciones de Extracción Sólido-Líquido (Tiempo y Temperatura)

En la evaluación de la cinética de liberación de polifenoles a diferentes temperaturas de extracción, se observó que para las extracciones realizadas a 40 y 60 °C la liberación de polifenoles ocurre de manera muy rápida durante los primeros minutos del proceso, donde en el tiempo inicial ($t = 0$) ya se tenía una liberación de 2,339 mg EAG/g FS y 2,680 mg EAG/g FS, respectivamente, presentando un comportamiento casi lineal en los tiempos evaluados (Figura 4), lo que limitó la aplicabilidad de los modelos cinéticos seleccionados para estas condiciones. Por tanto, el ajuste de los modelos se realizó únicamente para las extracciones a menor temperatura (4, 8, 12 y 22 °C), donde la cinética permitió una descripción adecuada del proceso (Tabla 2).

Figura 4

Contenido Total de Polifenoles a través del Tiempo de Extracción con una Relación Sólido/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v. (a) 40 °C, (b) 60 °C

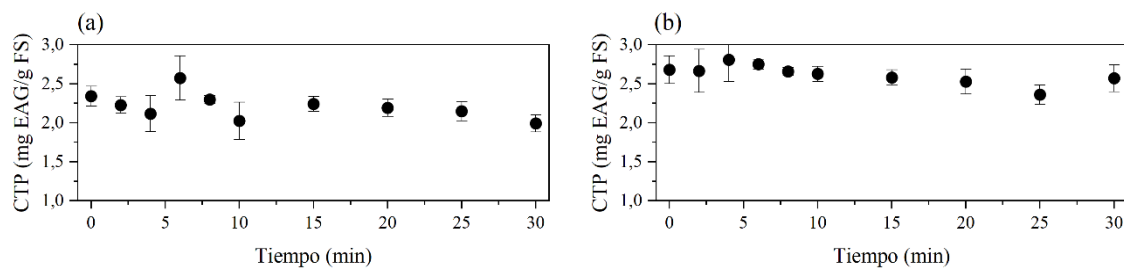


Tabla 2

Ajuste de Modelos Cinéticos a Diferentes Temperaturas de Extracción con una Relación Sólido/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v

	T (°C)	4	8	12	22
Peleg	k_1	0,224	0,286	0,294	0,766
	n	0,262	0,196	0,190	0,059
	R^2	0,599	0,543	0,623	0,649

Peleg modificado	k_2	0,103	0,075	0,050	0,017
	k_3	0,627	0,608	0,613	0,409
	R^2	0,985	0,948	0,845	0,890
Logarítmico	A	0,169	0,151	0,130	0,120
	B	1,155	1,251	1,304	2,142
	R^2	0,883	0,790	0,792	0,729
Rakotondramasy	k_4	4,863	6,164	8,270	12,355
	R^2	0,912	0,926	0,818	0,875
Weibull	k_5	2,165	3,638	6,020	18,329
	k_6	0,457	0,485	0,385	0,342
	R^2	0,987	0,951	0,856	0,897

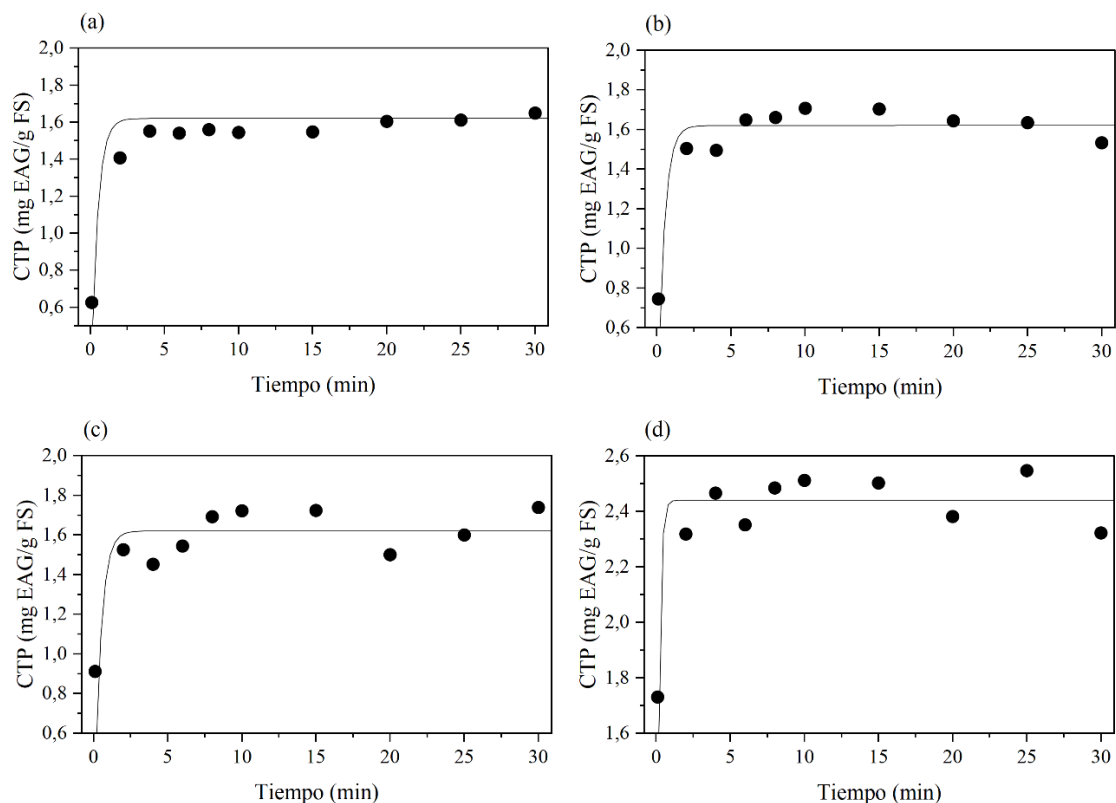
La Tabla 2 presenta los parámetros ajustados y los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los modelos cinéticos seleccionados. De manera general, los modelos evaluados mostraron un desempeño variable dependiendo de la temperatura de extracción. Sin embargo, el modelo de Weibull presentó los valores de R^2 más elevados en todas las condiciones estudiadas. Estos resultados indican que dicho modelo describe de manera más adecuada la cinética de extracción de polifenoles a partir de la fibra de açaí, en comparación con los demás modelos evaluados, lo cual concuerda con lo reportado por otros autores, quienes señalan que el modelo empírico de Weibull es el más apropiado para describir la cinética de extracción de distintos compuestos de matrices vegetales (Díaz-Bandera et al., 2015; Rodríguez et al., 2014; Trifković et al., 2015).

En el modelo de Weibull, el parámetro k_5 refleja la influencia de la temperatura sobre la velocidad de extracción y k_6 la forma del proceso de extracción, que indica cómo responde la materia prima durante la extracción, donde se denota la convexidad (disminución de la velocidad de extracción con el tiempo) o concavidad (aumento de la velocidad de extracción con el tiempo) de la curva de extracción. Se observó que k_5 aumentó con la temperatura, alcanzando su valor máximo a 22 °C, lo que sugiere una

mayor rapidez en la liberación de polifenoles a mayores condiciones de temperatura, este efecto puede atribuirse al incremento en la solubilidad de los analitos en el solvente y a la mejora en su tasa de difusión desde la matriz sólida, a medida que aumenta la temperatura (González-Centeno et al., 2015). Por su parte, k_6 presentó valores casi constantes y menores que 1 en todas las temperaturas evaluadas, lo que sugiere que la forma del perfil cinético fue inherente a la matriz y no estuvo gobernada por la temperatura en el rango estudiado. Asimismo, valores de $k_6 < 1$ indican que el proceso mantuvo una tasa de extracción decreciente en el tiempo (curva convexa) (González-Centeno et al., 2015).

Figura 5

Cinética de Extracción de Polifenoles Descrita por el Modelo Weibull a Diferentes Temperaturas de Extracción con una Relación Soluta/Solvente de 1/10 g/mL y Concentración de Solvente 65% v/v. (a) 4 °C, (b) 8 °C, (c) 12 °C, (d) 22 °C



En la Figura 5 se presentan los ajustes a los datos experimentales obtenidos para cada temperatura de extracción, donde tanto el tiempo como la temperatura tuvieron efecto significativo en el CTP ($p \leq 0,05$) (Apéndice C.4 y C.5). Las curvas de liberación de polifenoles de la fibra de açaí muestran un comportamiento cinético caracterizado por una extracción rápida en los primeros minutos, seguida de una fase de estabilización hasta alcanzar un valor cercano al equilibrio. Este perfil se explica en dos momentos, un incremento inicial acelerado debido a un alto gradiente de concentración entre la matriz sólida y el solvente, lo que favorece la rápida difusión de compuestos fenólicos fácilmente accesibles (probablemente ubicados en la superficie o en regiones más expuestas de la matriz fibrosa); posteriormente, al disminuir dicho gradiente, la extracción pasa a una etapa más lenta controlada por difusión interna desde el interior de la matriz vegetal (Hobbi et al., 2021; Psarrou et al., 2020).

En todos los casos, la liberación fue rápida alcanzando valores elevados desde los primeros minutos; por ejemplo, a 22 °C y 10 min (2,512 mg EAG/g FS). No obstante, las condiciones a temperaturas más altas mostraron, en términos globales, mayores valores de extracción. De acuerdo con los grupos homogéneos, las extracciones realizadas a 60 °C presentaron los CTP más altos, destacándose la condición de 60 °C y 4 min con un valor significativamente superior (2,807 mg EAG/g FS) frente a la mayoría de las demás combinaciones evaluadas. Considerando además criterios operativos como la reducción del tiempo de proceso y la eficiencia de extracción, esta condición fue seleccionada como óptima para los experimentos posteriores.

4.2 Fase 2

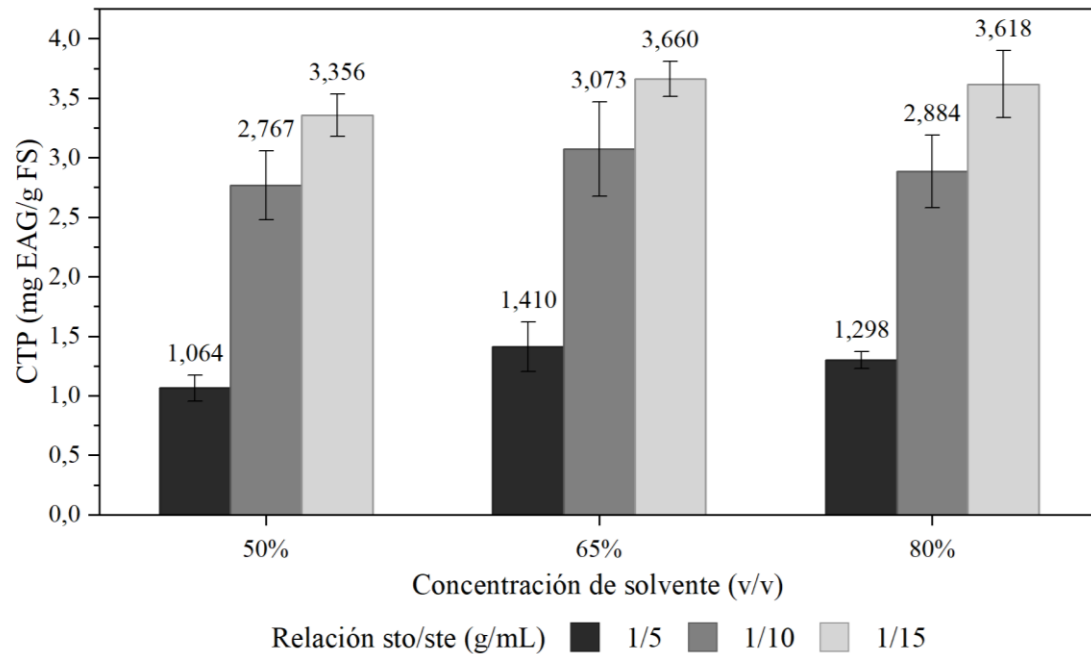
4.2.1 Condiciones de Extracción Sólido-Líquido (Relación Sólido/Solvente y Concentración de Solvente)

En la Figura 6 se observa que la mejor relación encontrada fue de 1 g de fibra de açai por cada 15 mL de solvente. Al comparar con Da Silva et al. (2021) (1 g de pulpa de açai liofilizada por cada 10 mL de solvente) y Melo et al. (2021) (1 g de semillas de açai liofilizadas por cada 10 mL de solvente) se puede observar que la relación soluto/solvente empleada por ellos es ligeramente menor a la que se seleccionó en esta fase.

Por otro lado, según Aliaño-González et al. (2020), la mejor relación soluto/solvente para maximizar la extracción es de 1 g de açai liofilizado por cada 20 mL de metanol, obteniendo valores de CTP de 12,04 mg EAG/g açai liofilizado, un resultado casi cuatro veces mayor al obtenido (3,66 mg EAG/g FS), pero esperable al tratarse de una muestra liofilizada de açai. En ambos casos, los autores fijaron la relación desde el inicio sin evaluar otras combinaciones, por lo que no se evidencia de manera clara la influencia de este factor. En este estudio se pudo evidenciar cómo la variación de la relación soluto/solvente es un aspecto de alta relevancia con un comportamiento directamente proporcional: al aumentar dicha relación, también lo hace el contenido de polifenoles, llegando a incrementar su valor hasta dos veces (Figura 6).

Figura 6

Contenido Total de Polifenoles a Diferentes Relaciones Soluta/Solvente y Concentraciones de Solvente a una Temperatura de 60 °C y un Tiempo de 4 min



De la misma forma, se observa que la concentración de solvente tiene impacto en la extracción realizada; en efecto, se puede ver que a mayor concentración de éste se logra una mejor extracción. En el rango evaluado, se observó un incremento del CTP hasta la concentración de solvente del 65% (3,660 mg EAG/g FS), sin embargo, a partir de este punto se evidenció una disminución en su valor (3,618 mg EAG/g FS). Esto coincide con la investigación de Da Silva et al. (2021), donde a una concentración de 70% etanol se obtuvieron valores de 345,32 mg EAG/ g açai liofilizado, en contraste con los obtenidos a una concentración del 100% etanol en donde se alcanzan valores de 93,99 mg EAG/ g açai liofilizado. Esto es similar a lo reportado por Muzykiewicz-Szymańska et al. (2024) donde la mejor concentración con la que se obtuvo el máximo CTP fue a 47% de etanol; dichos

autores afirman que las mezclas de etanol y agua presentan una mayor polaridad que el etanol absoluto, lo que puede influir positivamente en la eficiencia de extracción de compuestos fenólicos del material vegetal, debido a que los estos compuestos presentan una naturaleza predominantemente polar asociada a sus grupos hidroxilo ($-OH$). De esta forma, se puede inferir que no necesariamente un incremento en la concentración de etanol generará un aumento en el CTP.

Los resultados de esta fase evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) sobre el CTP al variar la relación soluto/solvente y la concentración de solvente, siendo 3,660 mg EAG/g FS el mayor contenido total de polifenoles obtenido en la fase. Los mejores parámetros de operación para maximizar el rendimiento de extracción corresponden a una relación soluto/solvente de 1/15 g/mL y una concentración de solvente al 65% etanol/agua.

4.2.2 Caracterización de los Extractos Polifenólicos

En la Tabla 3 se presentan los valores máximos de CTP obtenidos a partir de la fibra de açaí en este estudio. Al compararlos con la literatura, se observa que el contenido polifenólico es ligeramente menor al reportado por Viganó et al. (2022), quienes obtuvieron 3,9 mg EAG/g semilla y fibra de açaí seca, mediante extracción con líquidos presurizados (PLE) utilizando etanol/agua al 75%, a 65 °C durante 60 min, lo cual podría asociarse a las diferencias en la técnica empleada y/o condiciones de extracción. En contraste, Melo et al. (2021) informaron un contenido considerablemente mayor (64,58 mg GAE/g semilla de açaí liofilizada), dichas semillas fueron extraídas con 60% etanol a 25 °C por medio de extracción sólido-líquido convencional. Esta diferencia podría

atribuirse tanto a la variación en la matriz empleada como al método de secado, ya que la liofilización permite preservar las propiedades originales del material tras la deshidratación al eliminar la humedad mediante sublimación, lo que puede favorecer una mayor disponibilidad de compuestos fenólicos durante la extracción (Kittibunchakul et al., 2023).

Tabla 3

Contenido Total de Polifenoles, Capacidad Antioxidante y Capacidad Antirradicalaria de los Extractos con Mayor Rendimiento a una Temperatura de 60 °C y un Tiempo de 4 min

Concentración solvente (v/v)	Contenido total de polifenoles CTP (mg EAG/g FS)	Capacidad antioxidante ORAC (μmol ET/g ML)	Capacidad antirradicalaria DPPH (μmol ET/g FS)
50%	3,356 ± 0,179	1331 ± 396	3226 ± 238
65%	3,660 ± 0,147	1885 ± 456	1981 ± 823
80%	3,618 ± 0,282	1566 ± 432	1260 ± 145

En relación con la capacidad antioxidante determinada por ORAC, Viganó et al. (2022) reportaron 26 mg ET/g semilla y fibra de açaí seca (aproximadamente 104 μmol ET/g semilla y fibra de açaí seca), valor inferior al obtenido en el presente trabajo.

Por su parte, Melo et al. (2021) registraron una actividad antirradicalaria de 622,81 μmol ET/g semilla de açaí liofilizada, mientras que los extractos de fibra evaluados en este estudio presentaron valores superiores.

En conjunto, las diferencias observadas entre estudios pueden explicarse por el tipo de subproducto empleado, el tratamiento aplicado (como la liofilización) y las condiciones específicas de extracción (temperatura, tiempo y solvente), factores que influyen directamente en la recuperación y el perfil de los compuestos fenólicos extraídos.

4.3 Fase 3

4.3.1 Perfil Químico de los Extractos con Mayor Rendimiento

En la Tabla 4 se observan los compuestos presentes en los extractos con mayor rendimiento, determinados por UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS (Apéndice D). Los tres extractos evaluados presentaron un perfil polifenólico cualitativa y cuantitativamente similar. No obstante, al considerar de manera integral el perfil cromatográfico, el contenido total de polifenoles (CTP) y las propiedades antirradicalarias y antioxidantes previamente evaluadas, se aplicó un método de decisión multicriterio (tabla de ponderación) con el fin de integrar estos parámetros en la selección de la mejor condición de extracción, donde todas las variables de respuesta consideradas fueron ponderadas de manera equivalente (25% cada una). Los resultados de este análisis indicaron que la condición correspondiente a una concentración de 65 % etanol/agua obtuvo el mayor puntaje global (Apéndice E). En consecuencia, se seleccionó como mejor extracto aquel obtenido con una relación soluto/solvente de 1/15 y una concentración de 65% etanol/agua. La discusión detallada de la caracterización se presenta en la sección 4.3.3.

Tabla 4

Compuestos Fenólicos Predominantes en los Extractos con Mayor Rendimiento

Determinados por UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS

Compuesto	Concentración (mg/kg FS)		
	50%	65%	80%
Ácido <i>p</i> -hidroxibenzoico	24,7	30,6	28,3
Epicatequina	15,7	19,5	21,0
Rutina	1,5	2,8	1,8

4.3.2 Encapsulación del Mejor Extracto

Al encapsular polifenoles de la fibra de açai mediante secado por aspersión se observó que el polvo encapsulado caía al recipiente (a) y, de manera casi inmediata, era arrastrado de nuevo hacia el ciclón (b) donde se adhería a sus paredes, como se muestra en la Figura 7. Este comportamiento puede estar asociado a fenómenos de arrastre favorecidos por el menor tamaño de partícula y por la interacción del polvo con las corrientes de aire del sistema (Hanus & Langrish, 2007), así como a la generación de cargas electrostáticas que influyen en la adhesión y desprendimiento de las partículas dentro del secador (Nor Rashida et al., 2025), también se puede deber a que las condiciones de secado no fueron las óptimas para el encapsulamiento de este extracto. El rendimiento de encapsulación fue de 67,8% para el material recuperado en el ciclón y de 2,3% para el material recolectado en el recipiente. Al evaluar el CTP, se obtuvieron valores de 6,871 mg EAG/g PE en el ciclón y de 7,094 mg EAG/g PE en el recipiente. La disminución del CTP en el material recuperado en el ciclón puede atribuirse a que los polifenoles permanecieron expuestos a mayor temperatura y tiempo de residencia, lo que incrementó el riesgo de degradación (Muzykiewicz-Szymańska et al., 2024), sin embargo, la diferencia no es significativa.

Figura 7

Comportamiento del Polvo Encapsulado Durante el Secado por Aspersión



4.3.3 *Proposición de Aplicaciones del Mejor Extracto*

Industria Alimentaria. El ácido *p*-hidroxibenzoico, presente en el extracto, ha sido reportado como agente antioxidante y preservante en aplicaciones alimentarias, capaz de mejorar la estabilidad de productos alimenticios y materiales de envasado activo mediante reducción de radicales libres y retardación de procesos oxidativos (Wang & Jiang, 2022). Por otro lado, compuestos flavonoides como la epicatequina y la rutina han demostrado actividad antioxidante significativa en sistemas alimentarios, especialmente en la inhibición de la oxidación lipídica en aceites y matrices alimentarias. Por ejemplo, revisiones recientes sobre antioxidantes naturales en aceites comestibles resaltan que los compuestos fenólicos de origen vegetal ayudan a inhibir la peroxidación de lípidos y extender la vida útil de alimentos, respondiendo a la creciente demanda de ingredientes naturales frente a los tradicionales antioxidantes sintéticos (Abdo et al., 2025).

Adicionalmente, diversos estudios han demostrado la viabilidad de incorporar compuestos bioactivos de açaí en matrices alimentarias funcionales. La inclusión de açaí liofilizado en barras energéticas incrementó el contenido antioxidante sin comprometer las propiedades fisicoquímicas del producto final (Delgado et al., 2024). Además, la encapsulación de extractos de açaí se perfila como una estrategia clave para su incorporación en alimentos industrializados, ya que mejora la estabilidad de los polifenoles frente a procesos térmicos y condiciones de almacenamiento. Por ejemplo, el uso de zeína electropulverizada como encapsulante demostró proteger estos compuestos ante tratamientos de calor (López de Dicastillo et al., 2019), a su vez, el empleo de maltodextrina, goma arábiga y pectina permitió conservar el contenido polifenólico y la

actividad antioxidante incluso tras exposiciones prolongadas a temperaturas elevadas y exposición lumínica (Murillo-Franco et al., 2023).

Industria Dermocósmética. Los compuestos fenólicos del extracto obtenido presentan una potente capacidad antioxidante y propiedades biológicas que han sido estudiadas en el contexto del cuidado de la piel. De acuerdo con la revisión de Salazar et al. (2025), la amplia evidencia preclínica respalda y valida las posibles aplicaciones terapéuticas de los polifenoles para abordar los procesos patogénicos subyacentes de numerosas afecciones dermatológicas. Específicamente, el ácido *p*-hidroxibenzoico ha mostrado efectos inhibitorios sobre la producción de melanina y la actividad de la tirosinasa, además de una destacada capacidad de eliminación de radicales libres como $ABTS^{\bullet+}$ y $DPPH^{\bullet}$, lo que lo posiciona como un candidato potencial para la producción de agentes con efecto hipopigmentante (Shim et al., 2020). Asimismo, la rutina ha demostrado una capacidad estabilizante en sistemas emulsionados, lo cual resulta especialmente relevante en el desarrollo de formulaciones cosméticas tipo aceite/agua (O/W). Por otra parte, la epicatequina también ha sido asociada con efectos antioxidantes y antienvjecimiento en formulaciones tópicas. Se ha reportado que extractos de té verde enriquecidos en epicatequina presentan mayor eficacia en tratamientos antiarrugas en comparación con extractos no enriquecidos (Zillich et al., 2015).

Según Censi et al. (2018) se demostró que el extracto de açaí incorporado en una emulsión O/W, mantiene su contenido de polifenoles y actividad antioxidante, además de presentar estabilidad fisicoquímica, seguridad dermatológica y efecto protector frente a radiación UV. Estos resultados respaldan su potencial como ingrediente en formulaciones cosméticas antienvjecimiento.

Industria Farmacéutica. En la industria farmacéutica, el ácido *p*-hidroxibenzoico no se utiliza de forma directa; a diferencia de sus derivados, este compuesto actúa como precursor estructural de los ésteres de *p*-hidroxibenzoico, conocidos como parabenos, los cuales son ampliamente utilizados como conservantes antimicrobianos, extendiendo la vida útil de los productos (Hutchinson et al., 2010). Aunque a lo largo de los años, su uso ha sido controversial debido a sus efectos estrogénicos y su potencial como disruptores endocrinos (Karpuzoglu et al., 2013), los parabenos siguen siendo usados debido a su eficiente acción antimicrobiana (Nguyen et al., 2005).

Como se mencionó anteriormente, la epicatequina y la rutina tienen una gran actividad antioxidante y, debido a sus efectos antiinflamatorios, la epicatequina se ha investigado por su potencial en la medicina regenerativa, especialmente en la reparación de tejidos mediante el uso de materiales bioactivos como hidrogeles, nanopartículas y nanofibras (Miranda Buendia et al., 2025). Por otro lado, la rutina ha sido utilizada para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares; sin embargo, ha presentado dificultades para su aplicación debido a su baja solubilidad, es por esto que se han desarrollado diversas estrategias de nanoformulación y modificación estructural para mejorar su absorción (Yue et al., 2023).

En el estudio realizado por Previtalli-Silva et al. (2026) se utilizaron extractos de semillas de açai ricos en catequinas y procianidinas, los cuales presentaron un potencial antiparasitario, especialmente frente a etapas clínicamente relevantes de *Trypanosoma cruzi*, parásito causante de la enfermedad de Chagas, lo que permitió avanzar en la investigación adicional de nuevas estrategias terapéuticas para el tratamiento de la enfermedad.

5. Conclusiones

Se estableció que ni el pretratamiento de desengrasado ni la extracción asistida por ultrasonido generaron incrementos significativos en el contenido total de polifenoles. En contraste, la condición de extracción de 60 °C durante 4 minutos permitió alcanzar las mayores concentraciones de polifenoles (2,807 mg EAG/g FS). Además, el análisis cinético evidenció que el modelo de Weibull describió adecuadamente el comportamiento de extracción de polifenoles a partir de la fibra de açaí.

Se determinó que la combinación óptima para maximizar el rendimiento en la extracción de polifenoles corresponde a una relación soluto/solvente de 1/15 g/mL y una concentración de etanol/agua de 65%, condiciones que favorecieron un mayor contenido total de polifenoles (3,660 mg EAG/g FS).

Con base en la caracterización mediante UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS, el extracto obtenido en las condiciones óptimas presentó compuestos fenólicos como ácido *p*-hidroxibenzoico, epicatequina y rutina, lo que respalda su calidad y uso potencial como ingrediente funcional. Estos hallazgos permitieron proponer su aplicación en las industrias alimentaria, dermocosmética y farmacéutica.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio orientado a optimizar el encapsulamiento por secado por aspersión, evaluando las condiciones operativas, los tipos de agentes encapsulantes que permitan maximizar la eficiencia de encapsulación y la recuperación del extracto en el recipiente colector, minimizando la degradación de los polifenoles y pérdidas durante el proceso.

7. Referencias bibliográficas

- Abdelkebir, R., Alcántara, C., Falcó, I., Sánchez, G., Garcia-Perez, J. V., Neffati, M., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., & Collado, M. C. (2019). Effect of ultrasound technology combined with binary mixtures of ethanol and water on antibacterial and antiviral activities of *Erodium glaucophyllum* extracts. *Food Bioscience*, 35, 100547. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.009>
- Abdo, E. M., Shaltout, O. E., & Mansour, H. M. M. (2025). Natural antioxidants from agro-wastes enhanced the oxidative stability of soybean oil during deep-frying. *Food Chemistry*, 479, 143752. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114321>
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. *Current Research in Food Science*, 4(2), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>
- Aliaño, M. J. (2014). *Desarrollo de Técnicas de Extracción y Análisis de Polifenoles y Antocianos en Açaí (Euterpe olearacea)*.
- Aliaño-González, M. J., Espada-Bellido, E., Ferreira-González, M., Carrera, C., Palma, M., Ayuso, J., Álvarez, J. Á., & Barbero, G. F. (2020). Extraction of Anthocyanins and Total Phenolic Compounds from Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) Using an Experimental Design Methodology. Part 2: Ultrasound-Assisted Extraction. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 326, 10(3), 326. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10030326>
- Barros Dias, K. K., Araújo de Jesus, G., Farias da Costa, A. A., Fernandes Costa, F., da Rocha Filho, G. N., Oliveira, R. J., Rodrigues Noronha, R. C., & Santos do Nascimento, L. A. (2024). Biological activities from açaí (*Euterpe* spp. Mart.) seeds and their pharmacological aspects: A systematic review and meta-analysis. In *PharmaNutrition* (Vol. 29). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2024.100405>
- Cáceres-Roa, S. A., López-Giraldo, L. J., Muvdi-Nova, C. J., Cáceres-Roa, S. A., López-Giraldo, L. J., & Muvdi-Nova, C. J. (2023). Extracción de polifenoles: una comparación a partir de cáscara de cacao húmeda vs cáscara de cacao secada. *Ingeniería y Competitividad*, 25(2), 20612223. <https://doi.org/10.25100/IYC.V25I2.12223>

- Censi, R., Peregrina, D. V., Lacava, G., Agas, D., Lupidi, G., Sabbieti, M. G., & Di Martino, P. (2018). Cosmetic Formulation Based on an Açaí Extract. *Cosmetics 2018, Vol. 5, 5(3)*. <https://doi.org/10.3390/COSMETICS5030048>
- Corona-Jiménez, E., Martínez-Navarrete, N., Ruiz-Espinosa, H., & Carranza-Concha, J. (2016). Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de semillas de chia (*Salvia hispanica* L.) y su actividad antioxidante. *Agrociencia, 50(4)*, 403–412. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000400403&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Cruz Pessoa, J., Arduin, M., Martins, M. A., & Urano De Carvalho, J. E. (2010). Characterization of Açaí (*E. oleracea*) Fruits and its Processing Residues. *Arch. Biol. Technol. v, 53(6)*, 1451–1460.
- Da Silva, L. D., Sari, R., Diedrich, C., Pereira, C., De Lima, V. A., Oldoni, T. L. C., Perin, E. C., & Carpes, S. T. (2021). Extraction, characterization and antioxidant properties of phenolic compounds in açaí juçara (*Euterpe edulis* Mart.) from Atlantic Forest. *Brazilian Journal of Food Technology, 24*, 2021. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.19320>
- Delgado, C., Andrian, F., Pinargote, A., & José, F. (2024). Uso del açaí liofilizado (*Euterpe oleracea*) en la elaboración de barras energéticas con propiedades funcionales. *Perspectiva XXI, 2(3)*, 1–21. <https://doi.org/10.70577/y2bvf82>
- Díaz-Bandera, D., Villanueva-Carvajal, A., Dublán-García, O., Quintero-Salazar, B., & Dominguez-Lopez, A. (2015). Assessing release kinetics and dissolution of spray-dried Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract encapsulated with different carrier agents. *LWT - Food Science and Technology, 64(2)*, 693–698. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.047>
- Garzón, G. A., Narváez-Cuenca, C. E., Vincken, J. P., & Gruppen, H. (2017). Polyphenolic composition and antioxidant activity of açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) from Colombia. *Food Chemistry, 217*, 364–372. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.08.107>
- González Morales, A. N., López-Giraldo, L. J., Sogamoso González, E., & Moscote Chinchilla, Y. (2025). Evaluation of the Efficiency of Encapsulation and Bioaccessibility of Polyphenol

- Microcapsules from Cocoa Pod Husks Using Different Techniques and Encapsulating Agents. *Processes*, 13(10), 3094. <https://doi.org/10.3390/PR13103094/S1>
- González-Centeno, M. R., Comas-Serra, F., Femenia, A., Rosselló, C., & Simal, S. (2015). Effect of power ultrasound application on aqueous extraction of phenolic compounds and antioxidant capacity from grape pomace (*Vitis vinifera* L.): Experimental kinetics and modeling. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22(2), 506–514. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.027>
- Hanula, M., Wyrwisz, J., Moczowska, M., Horbańczuk, O. K., Pogorzelska-Nowicka, E., & Wierzbicka, A. (2020). Optimization of Microwave and Ultrasound Extraction Methods of Açai Berries in Terms of Highest Content of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 8325, 10(23), 8325. <https://doi.org/10.3390/APP10238325>
- Hanus, M. J., & Langrish, T. A. G. (2007). Resuspension of wall deposits in spray dryers. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 2007 8:11, 8(11), 1762–1774. <https://doi.org/10.1631/JZUS.2007.A1762>
- Hobbi, P., Okoro, O. V., Delporte, C., Alimoradi, H., Podstawczyk, D., Nie, L., Bernaerts, K. V., & Shavandi, A. (2021). Kinetic modelling of the solid–liquid extraction process of polyphenolic compounds from apple pomace: influence of solvent composition and temperature. *Bioresources and Bioprocessing* 2021 8:1, 8(1), 114-. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00465-4>
- Hutchinson, J., Runge, W., Mulvey, M., Norris, G., Yetman, M., Valkova, N., Villemur, R., & Lepine, F. (2010). Degradation of parabens by *Pseudomonas beteli* and *Burkholderia latens*. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 75(2), 206–212. <https://doi.org/10.1086/502394>
- Karpuzoglu, E., Holladay, S. D., & Gogal, R. M. (2013). Parabens: Potential impact of Low-Affinity Estrogen receptor Binding chemicals on Human health. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, 16(5), 321–335. <https://doi.org/10.1080/10937404.2013.809252>

- Kittibunchakul, S., Temviriyankul, P., Chaikham, P., & Kemsawasd, V. (2023). Effects of freeze drying and convective hot-air drying on predominant bioactive compounds, antioxidant potential and safe consumption of maoberry fruits. *LWT*, *184*(14), 114992. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114992>
- Koubaa, M., Mhemdi, H., Barba, F. J., Angelotti, A., Bouaziz, F., Chaabouni, S. E., & Vorobiev, E. (2016). Seed oil extraction from red prickly pear using hexane and supercritical CO₂: assessment of phenolic compound composition, antioxidant and antibacterial activities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *97*(2), 613–620. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7774>
- López de Dicastillo, C., Piña, C., Garrido, L., Arancibia, C., & Galotto, M. J. (2019). Enhancing Thermal Stability and Bioaccessibility of Açai Fruit Polyphenols through Electrohydrodynamic Encapsulation into Zein Electrosprayed Particles. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, *8*(10). <https://doi.org/10.3390/antiox8100464>
- Martins, G. R., do Amaral, F. R. L., Brum, F. L., Mohana-Borges, R., de Moura, S. S. T., Ferreira, F. A., Sangenito, L. S., Santos, A. L. S., Figueiredo, N. G., & Silva, A. S. A. da. (2020). Chemical characterization, antioxidant and antimicrobial activities of açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) extracts containing A- and B-type procyanidins. *LWT*, *132*, 109830. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109830>
- Melo, P. S., Selani, M. M., Gonçalves, R. H., Paulino, J. de O., Massarioli, A. P., & Alencar, S. M. de. (2021). Açai seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, *161*, 113204. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.113204>
- Mendes dos Santos, É., Toti, T. R. B., Santos, C. A. dos, Coco, J. C., Silvério, L. A. L., Santinon, C., Ataíde, J. A., Ramos, Y. J., Giacon, V. M., Paiva-Santos, A. C., Fardim, P., & Mazzola, P. G. (2025). What we know about açai by-products and topical formulations: A review. *International Journal of Pharmaceutics*, *680*, 125732. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125732>
- Miranda Buendia, E., González-Gómez, G. H., Maciel-Cerda, A., & González-Torres, M. (2025). Epicatechin Derivatives in Tissue Engineering: Antioxidant, Anti-Inflammatory,

- Regenerative Use. *Tissue Engineering - Part B: Reviews*, 31(6), 504–516. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2024.0206>
- Murillo-Franco, S. L., Galvis-Nieto, J. D., & Orrego, C. E. (2023). Encapsulation of Euterpe oleracea pulp by vacuum drying: Powder characterization and antioxidant stability. *Journal of Food Engineering*, 345(12), 111416. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111416>
- Muzykiewicz-Szymańska, A., Kucharska, E., Pelech, R., Nowak, A., Jakubczyk, K., & Kucharski, Ł. (2024). The Optimisation of Ultrasound-Assisted Extraction for the Polyphenols Content and Antioxidant Activity on Sanguisorba officinalis L. Aerial Parts Using Response Surface Methodology. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, 14(20). <https://doi.org/10.3390/app14209579>
- Nguyen, T., Brian, C., Guo, W., & Martinac, B. (2005). *The effects of parabens on the mechanosensitive channels of E. coli*. <https://doi.org/10.1007/s00249-005-0468-x>
- Nor Rashida, N. A. A., Zubairia, S. I., Faujanb, N. H., Rahmanc, I. A., & Zainal Abidin, N. (2025). *Electroconductivity Profiles on Spray Drying: Feasibility Study on Reducing Fouling Deposit on Borosilicate Drying Chamber Surface via Alternating Repulsive Charges*. <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/23809/8882>
- Oroian, M., Ursachi, F., & Dranca, F. (2020). Influence of ultrasonic amplitude, temperature, time and solvent concentration on bioactive compounds extraction from propolis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105021>
- Partnerships for Forests. (2024). *Contribuyendo a la bioeconomía en Colombia a través del fortalecimiento de la cadena de valor acai*.
- Pico-Hernández, S. M., Murillo-Méndez, C. J., & López-Giraldo, L. J. (2020). *Extraction, separation, and evaluation of antioxidant effect of the different fractions of polyphenols from cocoa beans*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309064760003>
- Pinheiro de Lima, A. C., Bastos, D. L. R., Camarena, M. A., Bon, E. P. S., Cammarota, M. C., Teixeira, R. S. S., & Gutarra, M. L. E. (2019). Physicochemical characterization of residual biomass (seed and fiber) from açai (Euterpe oleracea) processing and assessment of the potential for energy production and bioproducts. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2019 11:3, 11(3), 925–935. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00551-w>

- Previtali-Silva, H., Hardoim, D. de J., Banaggia, R. de L., Moragas-Tellis, C. J., Souza, P. V. R. de, Behrens, M. D., Silva, T. de S. D., Calabrese, K. da S., & Cardoso, F. de O. (2026). Effect of *Euterpe oleracea* Mart. (Açaí) Seed Bioproducts on *Trypanosoma cruzi*. *Biology* 2026, Vol. 15, 15(1). <https://doi.org/10.3390/biology15010096>
- Psarrou, I., Oreopoulou, A., Tsimogiannis, D., & Oreopoulou, V. (2020). Extraction Kinetics of Phenolic Antioxidants from the Hydro Distillation Residues of Rosemary and Effect of Pretreatment and Extraction Parameters. *Molecules* 2020, Vol. 25, 25(19). <https://doi.org/10.3390/molecules25194520>
- Ramón, C., Gil-Garzón, M. A., Ramón, C., & Gil-Garzón, M. A. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), 263–277. <https://doi.org/10.22430/22565337.1822>
- Reche, C., Rosselló, C., Dalmau, E., Eim, V., & Simal, S. (2022). Quantification of microstructural changes in artichoke by-products by image analysis after high-power ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds. *LWT*, 171, 114127. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.114127>
- Rodríguez, Ó., Ortuño, C., Simal, S., Benedito, J., Femenia, A., & Rosselló, C. (2014). Acoustically assisted supercritical CO₂ extraction of cocoa butter: Effects on kinetics and quality. *The Journal of Supercritical Fluids*, 94(2), 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.06.017>
- Rombaut, N., Chave, T., Nikitenko, S. I., Maâtaoui, M. El, Fabiano-Tixier, A. S., & Chemat, F. (2020). Modification of Olive Leaves' Surface by Ultrasound Cavitation. Correlation with Polyphenol Extraction Enhancement. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11010232>
- Salazar, J., Ortega, Á., Pérez, J. L., Garrido, B., Santeliz, R., Galbán, N., Díaz, M. P., Cano, R., Cano, G., Contreras-Velasquez, J. C., & Chacín, M. (2025). Role of Polyphenols in Dermatological Diseases: Exploring Pharmacotherapeutic Mechanisms and Clinical Implications. *Pharmaceuticals*, 18(2). <https://doi.org/10.3390/ph18020247>

- Shim, S. Y., Lee, Y. E., Song, H. Y., & Lee, M. (2020). p-Hydroxybenzoic Acid β -d-Glucosyl Ester and Cimidahurinine with Antimelanogenesis and Antioxidant Effects from *Pyracantha angustifolia* via Bioactivity-Guided Fractionation. *Antioxidants* 2020, Vol. 9, 9(3). <https://doi.org/10.3390/antiox9030258>
- Spigno, G., & De Faveri, D. M. (2007). Antioxidants from grape stalks and marc: Influence of extraction procedure on yield, purity and antioxidant power of the extracts. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 793–801. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.020>
- Toro Uribe, S. (2018). *Encapsulation of Antioxidants from Theobroma Cacao L. for food applications: in vitro Bioaccessibility and Kinetic release profile.*
- Trifković, K., Milašinović, N., Djordjević, V., Zdunić, G., Kalagasidis Krušić, M., Knežević-Jugović, Z., Šavikin, K., Nedović, V., & Bugarski, B. (2015). Chitosan crosslinked microparticles with encapsulated polyphenols: Water sorption and release properties. *Journal of Biomaterials Applications*, 30(5), 618–631. <https://doi.org/10.1177/0885328215598940>
- Viganó, J., de Aguiar, A. C., Veggi, P. C., Sanches, V. L., Rostagno, M. A., & Martínez, J. (2022). Techno-economic evaluation for recovering phenolic compounds from acai (*Euterpe oleracea*) by-product by pressurized liquid extraction. *Journal of Supercritical Fluids*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105413>
- Wang, J., & Jiang, Z. (2022). Synthesis, characterisation, antioxidant and antibacterial properties of p-hydroxybenzoic acid-grafted chitosan conjugates. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 1283–1290. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15518>
- Yue, W., Meng, L., Wang, Y., & Qin, Y. (2023). Detection of rutin in *Sophora japonica* by chitosan-based carbon dots paper chip. *中草药*, 52(20), 6413–6424. <https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2021.20.032>
- Zillich, O. V., Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P., & Kerscher, M. (2015). Polyphenols as active ingredients for cosmetic products. *International Journal of Cosmetic Science*, 37(5), 455–464. <https://doi.org/10.1111/ics.12218>

APÉNDICES

Apéndice A. Curvas de Calibración

Figura A.1

Curva de Calibración de Ácido Gálico (Folin-Ciocalteu)

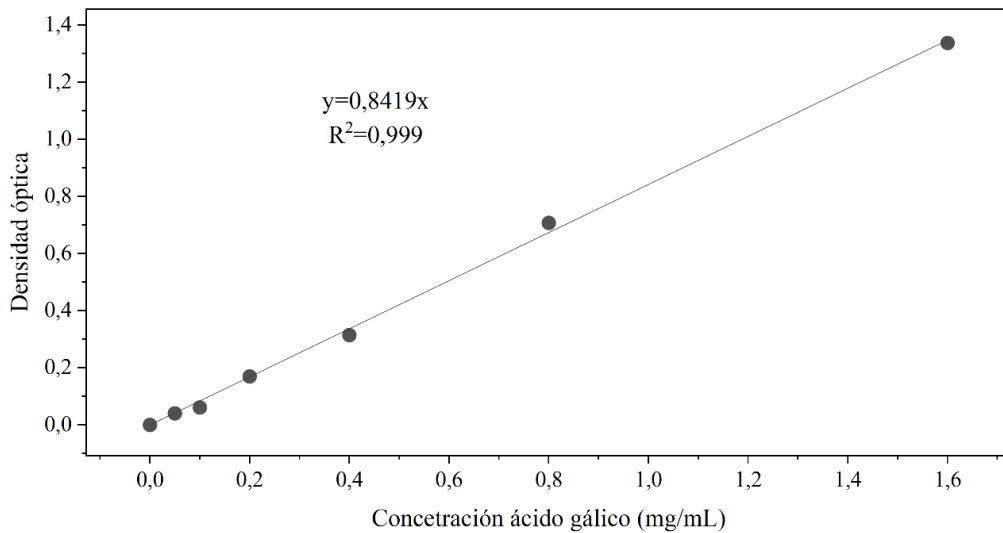
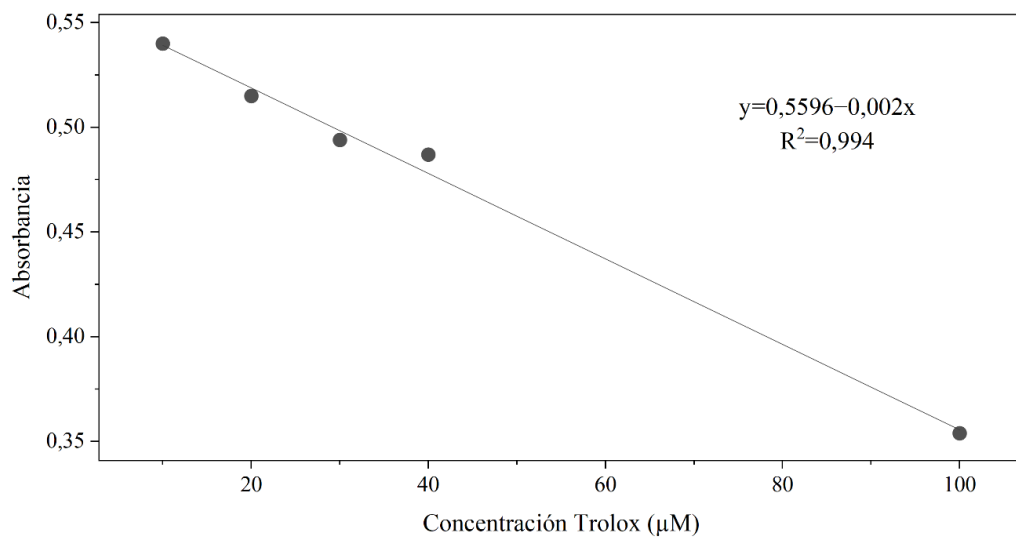


Figura A.2

Curva de calibración de Trolox (DPPH)



Apéndice B. Contenido total de polifenoles (CTP)**Tabla B.1***CTP del pretratamiento – con/sin desengrasar*

		DO _{prom}	Concentración (mg EAG/ mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/ g FS)
Con desengrasar	M	0,413	0,422	4,997	33	2,785
	D	0,370	0,371	4,996	36	2,675
	T	0,353	0,351	4,999	36	2,526
Sin desengrasar	M	0,421	0,431	5,001	38	3,276
	D	0,411	0,419	5,004	36	3,016
	T	0,423	0,434	5,001	36	3,127

Tabla B.2*CTP de la extracción asistida por ultrasonido (UAE)*

Temperatura* (°C)	Tiempo* (min)		DO _{prom}	Concentración (mg EAG/ mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/ g FS)
5	10	M	0,421	0,4315	5,004	33	2,845
		D	0,427	0,4392	5,008	38	3,332
		T	0,421	0,4318	5,002	36	3,107
	20	M	0,428	0,4404	5,001	37	3,258
		D	0,415	0,4249	5,003	36	3,058
		T	0,427	0,4386	5,000	36	3,158
	30	M	0,405	0,4122	5,004	37	3,048
		D	0,407	0,4148	5,001	36	2,986
		T	0,455	0,4718	4,996	35	3,306
25	10	M	0,424	0,4350	5,003	38	3,304
		D	0,432	0,4442	5,003	38	3,374
		T	0,425	0,4362	5,003	37	3,226
	20	M	0,421	0,4312	5,001	39	3,362
		D	0,411	0,4193	5,004	37	3,100
		T	0,423	0,4344	5,001	36	3,127
	30	M	0,417	0,4267	5,003	36	3,070
		D	0,434	0,4466	4,998	36	3,217
		T	0,410	0,4190	5,000	36	3,017

45	10	M	0,385	0,3884	5,003	36	2,795
		D	0,420	0,4309	5,001	37	3,188
		T	0,410	0,4181	5,002	39	3,260
	20	M	0,383	0,3860	5,005	38	2,931
		D	0,438	0,4514	5,001	36	3,249
		T	0,427	0,4389	5,000	37	3,248
	30	M	0,414	0,4234	5,003	36	3,047
		D	0,425	0,4365	5,002	33	2,880
		T	0,433	0,4460	5,000	31	2,765

**Temperatura y tiempo de ultrasonido*

Tabla B.3

CTP de la extracción sólido-líquido a condiciones intermedias (control)

	DO_{prom}	Concentración (mg EAG/ mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/g FS)
M	0,432	0,4442	5,003	34	3,019
D	0,483	0,5054	5,002	36	3,638
T	0,446	0,4618	5,002	35	3,231

Tabla B.4

CTP de la extracción sólido-líquido (temperatura y tiempo)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)		DO_{prom}	Concentración (mg EAG/ mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/ g FS)
4	0	M	0,131	0,0876	2,006	13,5	0,590
		D	0,134	0,0909	1,999	14,5	0,659
	2	M	0,229	0,2034	2,005	14,2	1,441
		D	0,221	0,1939	2,005	14,2	1,373
	4	M	0,254	0,2328	2,005	13,8	1,602
		D	0,241	0,2180	2,005	13,8	1,500
	6	M	0,265	0,2459	2,005	13,4	1,643
		D	0,239	0,2153	2,005	13,4	1,439
	8	M	0,257	0,2364	2,005	13	1,533
		D	0,264	0,2447	2,005	13	1,586

	10	M	0,265	0,2462	2,005	12,6	1,547
		D	0,264	0,2453	2,005	12,6	1,541
	15	M	0,275	0,2580	2,005	12,2	1,570
		D	0,269	0,2506	2,005	12,2	1,525
	20	M	0,286	0,2708	2,005	11,8	1,594
		D	0,289	0,2744	2,005	11,8	1,615
	25	M	0,297	0,2845	2,005	11,4	1,617
		D	0,295	0,2824	2,005	11,4	1,606
	30	M	0,306	0,2952	2,005	11	1,619
		D	0,315	0,3062	2,005	11	1,680
	0	M	0,151	0,1105	1,999	12,5	0,691
		D	0,145	0,1033	2,002	15,5	0,800
	2	M	0,249	0,2278	2,007	14,2	1,611
		D	0,251	0,2295	2,005	12,2	1,397
	4	M	0,222	0,1951	2,007	13,8	1,342
		D	0,293	0,2800	2,005	11,8	1,648
	6	M	0,276	0,2592	2,007	13,4	1,731
		D	0,289	0,2753	2,005	11,4	1,565
	8	M	0,287	0,2729	2,007	13	1,768
		D	0,296	0,2830	2,005	11	1,553
8	10	M	0,295	0,2818	2,007	12,6	1,769
		D	0,320	0,3112	2,005	10,6	1,645
	15	M	0,299	0,2871	2,007	12,2	1,746
		D	0,333	0,3266	2,005	10,2	1,661
	20	M	0,305	0,2943	2,007	11,8	1,730
		D	0,326	0,3186	2,005	9,8	1,557
	25	M	0,302	0,2898	2,007	11,4	1,646
		D	0,349	0,3462	2,005	9,4	1,623
	30	M	0,295	0,2815	2,007	11	1,543
		D	0,343	0,3394	2,005	9	1,524
	0	M	0,179	0,1446	2,000	13,6	0,983
		D	0,170	0,1339	2,010	12,6	0,840
	2	M	0,271	0,2530	2,000	13,2	1,670
		D	0,249	0,2275	2,010	12,2	1,381
	4	M	0,294	0,2803	2,000	12,8	1,794
		D	0,217	0,1892	2,010	11,8	1,110
12	6	M	0,280	0,2640	2,000	12,4	1,637
		D	0,273	0,2560	2,010	11,4	1,452
	8	M	0,305	0,2934	2,000	12	1,760
		D	0,307	0,2968	2,010	11	1,624
	10	M	0,327	0,3198	2,000	11,6	1,855
		D	0,311	0,3011	2,010	10,6	1,588

22	15	M	0,339	0,3341	2,000	11,2	1,871
		D	0,319	0,3106	2,010	10,2	1,576
	20	M	0,294	0,2809	2,000	10,8	1,517
		D	0,314	0,3044	2,010	9,8	1,484
	25	M	0,354	0,3522	2,000	10,4	1,831
		D	0,304	0,2928	2,010	9,4	1,369
	30	M	0,353	0,3507	2,000	10	1,753
		D	0,382	0,3848	2,010	9	1,723
	0	M	0,254	0,2337	10,004	79	1,846
		D	0,237	0,2126	10,000	76	1,616
	2	M	0,303	0,2910	10,004	78	2,269
		D	0,323	0,3157	10,000	75	2,367
	4	M	0,321	0,3133	10,004	77	2,411
		D	0,344	0,3406	10,000	74	2,520
	6	M	0,319	0,3106	10,004	76	2,360
		D	0,328	0,3210	10,000	73	2,343
	8	M	0,329	0,3225	10,004	75	2,418
		D	0,356	0,3543	10,000	72	2,551
	10	M	0,349	0,3459	10,004	74	2,559
		D	0,350	0,3471	10,000	71	2,465
15	M	0,360	0,3587	10,004	73	2,618	
	D	0,345	0,3409	10,000	70	2,386	
20	M	0,334	0,3281	10,004	72	2,367	
	D	0,351	0,3480	10,000	69	2,401	
25	M	0,354	0,3516	10,004	71	2,495	
	D	0,379	0,3822	10,000	68	2,599	
30	M	0,321	0,3124	10,004	70	2,186	
	D	0,367	0,3670	10,000	67	2,459	
40	0	M	0,321	0,3124	5,001	36	2,249
		D	0,359	0,3578	5,005	34	2,431
	2	M	0,316	0,3073	5,001	35	2,151
		D	0,351	0,3489	5,005	33	2,301
	4	M	0,299	0,2871	5,001	34	1,952
		D	0,358	0,3563	5,005	32	2,278
	6	M	0,411	0,4202	5,001	33	2,773
		D	0,380	0,3828	5,005	31	2,371
	8	M	0,355	0,3534	5,001	32	2,261
		D	0,386	0,3896	5,005	30	2,335
	10	M	0,310	0,2993	5,001	31	1,855
		D	0,376	0,3786	5,005	29	2,194
	15	M	0,382	0,3851	5,001	30	2,310
		D	0,385	0,3884	5,005	28	2,173

60	20	M	0,387	0,3914	5,001	29	2,270
		D	0,387	0,3917	5,005	27	2,113
	25	M	0,394	0,3991	5,001	28	2,235
		D	0,392	0,3967	5,005	26	2,061
	30	M	0,380	0,3828	5,001	27	2,067
		D	0,380	0,3834	5,005	25	1,915
	0	M	0,374	0,3759	5,004	34	2,554
		D	0,395	0,4006	4,999	35	2,805
	2	M	0,373	0,3745	5,004	33	2,469
		D	0,412	0,4205	4,999	34	2,860
	4	M	0,401	0,4080	5,004	32	2,609
		D	0,441	0,4552	4,999	33	3,005
	6	M	0,425	0,4368	5,004	31	2,706
		D	0,425	0,4365	4,999	32	2,794
	8	M	0,426	0,4371	5,004	30	2,621
		D	0,424	0,4347	4,999	31	2,696
	10	M	0,429	0,4410	5,004	29	2,556
		D	0,436	0,4493	4,999	30	2,696
	15	M	0,435	0,4484	5,004	28	2,509
		D	0,442	0,4570	4,999	29	2,651
20	M	0,434	0,4475	5,004	27	2,415	
	D	0,455	0,4716	4,999	28	2,641	
25	M	0,426	0,4371	5,004	26	2,271	
	D	0,439	0,4534	4,999	27	2,449	
30	M	0,470	0,4903	5,004	25	2,449	
	D	0,493	0,5176	4,999	26	2,692	

Tabla B.5

CTP de la extracción sólido-líquido (concentración de solvente y relación soluto/solvente)

Concentración solvente (v/v)	Relación soluto/solvente (g/mL)		DO _{prom}	Concentración (mg EAG/mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/g FS)
50%	1/5	M	0,641	0,6934	2,002	2,8	0,970
		D	0,587	0,6292	1,999	3,3	1,039
		T	0,611	0,6577	1,999	3,6	1,185
	1/10	M	0,382	0,3851	2,000	13	2,503
		D	0,373	0,3750	2,001	14,5	2,718
		T	0,404	0,4110	2,002	15	3,079

		M	0,324	0,3162	2,001	22	3,477
	1/15	D	0,299	0,2866	2,001	22	3,151
		T	0,304	0,2925	1,998	23,5	3,440
		M	0,690	0,7510	2,003	3,2	1,200
	1/5	D	0,669	0,7260	2,000	3,9	1,416
		T	0,737	0,8074	2,000	4	1,615
65%	1/10	M	0,477	0,4986	2,001	13	3,239
		D	0,463	0,4811	2,006	14	3,357
		T	0,398	0,4038	2,002	13	2,622
	1/15	M	0,317	0,3085	2,000	23	3,548
		D	0,316	0,3067	2,000	23,5	3,604
		T	0,326	0,3192	2,002	24	3,827
80%	1/5	M	0,610	0,6563	1,999	4,2	1,379
		D	0,561	0,5983	2,002	4,2	1,255
		T	0,588	0,6301	2,001	4	1,260
	1/10	M	0,415	0,4243	2,001	12,5	2,651
		D	0,432	0,4451	2,000	14,5	3,227
		T	0,392	0,3967	2,002	14	2,774
	1/15	M	0,292	0,2782	1,995	25	3,487
		D	0,299	0,2863	2,006	24	3,425
		T	0,334	0,3284	2,000	24	3,941

Tabla B.6*CTP de la encapsulación*

		DO _{prom}	Concentración (mg EAG/ mL muestra)	Peso _m (g)	Volumen _m (mL)	CTP (mg EAG/ g PE)
Ciclón	M	0,626	0,688	0,1	1	6,877
	D	0,625	0,687	0,1	1	6,865
Recipiente	M	0,644	0,709	0,1	1	7,094

Apéndice C. Análisis de Varianza ANOVA y Prueba Post Hoc TUKEY (HSD)**Tabla C.1***Análisis de varianza para pretratamiento – con/sin desengrasar*

Efecto	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Muestra	0,05078	2	0,02539	2,982	0,251110
Condición (con/sin desengrasar)	0,34328	1	0,34328	40,319	0,023916
Error	0,01703	2	0,00851		

Tabla C.2*Análisis de varianza para condiciones de extracción asistida por ultrasonido*

Efecto	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Muestra	0,0318	2	0,0159	0,54	0,593239
Tiempo	0,0942	2	0,0471	1,599	0,232850
Temperatura	0,1146	2	0,0573	1,945	0,175304
Tiempo*Temperatura	0,0698	4	0,0175	0,593	0,672818
Error	0,4712	16	0,0295		

Tabla C.3*Análisis de varianza para método de extracción – con/sin ultrasonido*

Efecto	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Muestra	0,13322	2	0,06661	1,769	0,361197
Condición (con/sin ultrasonido)	0,00005	1	0,00005	0,001	0,974869
Error	0,07532	2	0,03766		

Tabla C.4*Análisis de varianza para condiciones de extracción sólido-líquido (tiempo y temperatura)*

Efecto	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Muestra	0,0215	1	0,0215	0,92	0,341524
Tiempo	2,5116	9	0,2791	11,94	0,000000
Temperatura	25,3696	5	5,0739	217,13	0,000000
Tiempo*Temperatura	2,8766	45	0,0639	2,74	0,000161
Error	1,3787	59	0,0234		

Tabla C.5*Prueba post hoc TUKEY (HSD) para condiciones de extracción sólido-líquido*

Tiempo	Temperatura	CTP	o	n	m	l	k	j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
0	8	0,679	o														
0	4	0,881	o	n													
0	12	0,911	o	n	m												
2	4	1,407		n	m	l											
4	12	1,452		n	m	l											
4	8	1,495		n	m	l	k										
20	12	1,500		n	m	l	k										
2	8	1,504		n	m	l	k										
2	12	1,525		n	m	l	k										
8	8	1,532		n	m	l	k	j									
30	8	1,533		n	m	l	k	j									
6	4	1,541			m	l	k	j									
10	4	1,544			m	l	k	j									
6	12	1,544			m	l	k	j									
15	4	1,548			m	l	k	j									
4	4	1,551			m	l	k	j									
8	4	1,560			m	l	k	j									
25	12	1,600				l	k	j	i								
20	4	1,604				l	k	j	i								
25	4	1,612				l	k	j	i								
25	8	1,635				l	k	j	i								
20	8	1,644				l	k	j	i	h							

Tabla C.6

Análisis de varianza para condiciones de extracción sólido-líquido (relación soluto/solvente y concentración solvente)

Efecto	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Muestra	0,093	2	0,0465	0,776	0,476628
Concentración	0,4688	2	0,2344	3,914	0,041341
Relación	25,0773	2	12,5387	209,338	0,000000
Concentración*Relación	0,0236	4	0,0059	0,098	0,981439
Error	0,9583	16	0,0599		

Tabla C.7

Prueba post hoc TUKEY (HSD) para condiciones de extracción sólido-líquido (relación soluto/solvente y concentración solvente)

Concentración	Relación	CTP	1	2	3
50	5	1,064			a
80	5	1,298			a
65	5	1,410			a
50	10	2,767	c		
80	10	2,884	c		
65	10	3,073	c	b	
50	15	3,356	c	b	
80	15	3,618		b	
65	15	3,660		b	

Apéndice D. Informe de Resultados Determinación de Compuestos Fenólicos en Muestras Líquidas y/o Sólidas por Cromatografía Líquida de Ultra-alta Resolución con Detector de Masas ORBITRAP, UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS

Compuesto	t _R (min)	NMC (mg/kg)	Concentración en las muestras (mg/kg)		
			ID: EFA50	ID: EFA65	ID: EFA80
Ácido cafeico	4,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido ferúlico	5,5	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido <i>p</i> -cumárico	4,7	0,1	<0,1*	<0,1	<0,1*
Ácido <i>p</i> -hidroxibenzoico	3,6	0,1	3,3	3,3	3,1
Ácido rosmarínico	5,5	2,0	<2,0*	<2,0*	<2,0*
Ácido <i>trans</i> -cinámico	6,1	0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Ácido ursólico	9,5	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido vanílico	4,6	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Apigenina	6,7	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cafeína	4,1	0,1	<0,1*	<0,1*	<0,1*
Epicatequina	3,7	0,1	2,1	2,1	2,3
Epicatequina galato	4,8	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Epigallocatequina galato	4,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Luteolina	6,4	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Naringenina	6,2	0,1	<0,1	<0,1*	<0,1*
Pinocembrina	7,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Quercetina	6,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Rutina	5,4	0,1	0,2	0,3	0,2
Teobromina	3,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1*
Teofilina	3,6	0,1	<0,1	<0,1	<0,1

* Detectado por debajo del nivel mínimo de cuantificación y por encima del nivel mínimo de detección del método empleado.

Nota. Tiempos de retención (t_R), nivel mínimo de cuantificación (NMC) y resultados del análisis de compuestos fenólicos en la muestra, analizada por UHPLC-ESI-ORBITRAP-MS. ID: EFA50, EFA65 y EFA80 hacen referencia a los extractos polifenólicos de relación soluto solvente 1:15 g/mL y concentración solvente 50%, 65%, 80% v/v, respectivamente.

Apéndice E. Método de Decisión Multicriterio mediante Tabla de Ponderación

Concentración de solvente (v/v)	CTP	ORAC	DPPH	Compuestos fenólicos	CTP _{norm}	ORAC _{norm}	DPPH _{norm}	Compuestos fenólicos _{norm}	TOTAL
50%	3,356	1331	3226	41,9	0,000	0,000	1,000	0,000	0,250
65%	3,660	1885	1981	52,9	1,000	1,000	0,367	1,000	0,842
80%	3,618	1566	1260	51,1	0,862	0,424	0,000	0,836	0,531
FACTOR DE PONDERACIÓN					25%	25%	25%	25%	100%

Nota. Los valores normalizados se obtuvieron mediante escalamiento min-max y el puntaje total corresponde a la suma ponderada de cada criterio.