



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



**FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y
BIOTECNOLOGÍA**

CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Tema: Optimización del proceso de extracción de compuestos polifenólicos microencapsulados procedentes del canayuyo (*Sonchus oleraceus* L).

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniera Biotecnóloga, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autora: Cindy Lisbeth Ganchala Tigmasa

Tutor: Dr. Orestes Darío López Hernández

Ambato – Ecuador

Julio – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dr. Orestes Darío López Hernández

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación el mismo que responde a las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 20 de Junio de 2025



Dr. Orestes Darío López Hernández

1754784864

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cindy Lisbeth Ganchala Tigmasa manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera Biotecnóloga, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Cindy Lisbeth Ganchala Tigmasa

0503024598

AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



Cindy Lisbeth Ganchala Tigmasa

0503024598

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Presidente del Tribunal



Mg. Danae Fernández Rivero

1757181209



Dr. José Homero Vargas Lopez

1801978048

Ambato, 07 de Julio de 2025

DEDICATORIA

"Encomienda a Jehová tus obras, y tus pensamientos serán afirmados."

Proverbios 16:3

A Dios, mi refugio, mi fortaleza y mi persona.

A mi madre, por su amor inquebrantable, su esfuerzo, su dedicación y su apoyo constante. A mi padre, por ser mi pilar y siempre asegurarme un camino para seguir adelante, incluso en tiempos difíciles.

A mi hermanita, por su amistad y apoyo en los momentos más complejos.

Y, aunque ya no esté físicamente, a mi querido abuelito Rafael, cuyo amor y sabiduría siguen guiando mis pasos. Este logro también es tuyo, abuelito, y siempre te llevaré en mi corazón. A mis dos abuelitas Mercedes y Piedad, por su amor; consejos y cariño.

A toda mi familia, por sus consejos, y sobre todo el apoyo constante.

A todos quienes confiaron en mí, les dedico este logro con todo mi amor y gratitud.

Este es el resultado de un esfuerzo colectivo, el reflejo de los valores que me han transmitido y la fortaleza que me brindaron. Con todo mi corazón, gracias por estar siempre ahí, y motivarme a ser la mejor versión de mí misma.

Cindy Ganchala

AGRADECIMIENTO

Hoy, al culminar esta etapa universitaria, reflexionó sobre todo lo aprendido y las personas que me han acompañado. Este logro no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de quienes siempre estuvieron a mi lado.

*A Dios, por ser mi guía, luz y fuente de fortaleza en cada paso de este arduo camino.
Sin tu bendición, nada de esto habría sido posible.*

A madre Flor y mi padre Nelson, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido la base para seguir adelante. Ambos me han enseñado el valor del esfuerzo, la perseverancia y la dedicación. Su fe en mí, incluso en los momentos de duda, ha sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante. Los amo.

A mi hermanita menor Mabe, por su cariño, apoyo y por ser una presencia constante en mi vida. Este logro también es gracias a ti. A mis queridos familiares, gracias por su apoyo y aliento en todo momento. No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud hacia ustedes en este camino.

A mis confidentes, Lenin y Zule, por su amistad incondicional, por brindarme su apoyo, consejos y compañía. Gracias por ser mi fortaleza, por hacerme reír en los días más complicados y por ser una parte fundamental en mi vida.

Al Dr. Orestes López, gracias por la confianza, paciencia y dedicación, sus consejos fueron claves para el desarrollo de esta investigación.

A Kevin Andrés, por su valiosa compañía, por su apoyo, cariño y por las risas compartidas. Sus palabras fueron importantes en momentos difíciles, Gracias.

A aquellas personas especiales que conocí en este viaje Steven D, Alejandro, Mateo, Wendy, Sebas, Less, Michu, Diego, Isma, Danny G., Gabo, Liz, Henry P., William, Paola I., Yaja, Andy y Antonny por su apoyo, aliento y motivación para seguir adelante. Gracias por ofrecerme su tiempo y, sobre todo por creer en mi cuando yo dudaba de mis propias capacidades.

A mí mismo, por no saber rendirme, por seguir adelante a pesar de los obstáculos y por el esfuerzo y determinación abren cualquier camino.! Lo logramos ¡

Cindy Ganchala

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
INDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema y justificación	1
1.1.1 Generalidades.....	3
1.1.2 Canayuyo (<i>Sonchus oleraceus</i> L).....	4
1.1.2.1 Historia.....	4
1.1.2.2 Taxonomía.....	5
1.1.2.3 Usos.....	6
1.1.2.4 Composición	7
1.1.3 Polifenoles.....	8
1.1.3.1 Generalidades.....	8
1.1.3.2 Estructura y clasificación	9
1.1.3.3 Importancia	10
1.1.3.4 Propiedades antioxidantes y bioactivas.....	11

1.1.4 Métodos de extracción de polifenoles.....	11
1.1.4.1 Generalidades de extracción	11
1.1.4.2 Extracción Soxhlet	11
1.1.5 Cuantificación de metabolitos secundarios (polifenoles) de canayuyo (<i>Sonchus oleraceus</i> L)	14
1.1.5.1 Método de Folin-Ciocalteu	15
1.1.6 Optimización del Proceso de Extracción	16
1.1.6.1 Método de superficie de respuesta (RSM) aplicado a la extracción	17
1.1.6.2 Evaluación de parámetros óptimos para maximizar el rendimiento y estabilidad de los polifenoles	18
1.1.7 Microencapsulación	19
1.1.7.1 Generalidades.....	19
1.1.7.2 Microencapsulación mediante secado por aspersión	20
1.1.7.3 Ventajas de microencapsulado mediante secado por aspersión	22
1.1.7.4 Microencapsulación de compuestos polifenólicos.....	23
1.1.8 Evaluación de la actividad antioxidante.....	24
1.1.8.1 Generalidades.....	24
1.1.8.2 Ensayo de la capacidad antioxidante (DPPH).....	25
1.1.8.3 Aplicaciones de los polifenoles en la industria alimentaria y farmacéutica...	26
1.2 Objetivos	27
1.2.1 Objetivo general.....	27
1.2.2 Objetivos específicos	27
1.3 Hipótesis científica.....	27
1.4 Variables.....	27
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	28
2.1. Materiales.....	28
2.2. Métodos.....	31

2.2.1. Extracción de metabolitos secundarios de <i>Sonchus oleraceus</i> L por los métodos de Soxhlet y extracción asistida con ultrasonidos.	31
2.2.1.1. Obtención del material vegetal.....	32
2.2.1.2. Preparación de material vegetal	33
2.2.1.3. Diseño experimental.....	34
2.2.1.4. Extracción de compuestos polifenólicos	34
2.2.1.4.1. Extracción por método de ultrasonido (UAE)	35
2.2.1.4.2. Extracción por método de Soxhlet	36
2.2.1.5. Determinación de sólidos solubles totales (SST).....	37
2.2.1.6. Cuantificación de metabolitos secundarios.....	39
2.2.1.6.1. Determinación de polifenoles totales	40
2.2.1.7 Análisis estadístico	41
2.2.2 Estabilización de los metabolitos secundarios (polifenoles) extraídos de <i>Sonchus oleraceus</i> L aplicando el método de microencapsulación mediante secado por aspersión.	42
2.2.2.1 Microencapsulación de polifenoles mediante secado por aspersión.....	42
2.2.2.2 Determinación cuantitativa de eficiencia de la microencapsulación	44
2.2.2.3. Determinación cualitativa de eficiencia de la microencapsulación	44
2.2.3.1. Curva de calibración para el análisis de la actividad antioxidante.....	45
2.2.3.2. Análisis de la actividad antioxidante de los polifenoles empleando el método DPPH (2,2 diphenil-1-1-picrylhdrazil)	46
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1. Análisis y discusión de resultados.....	47
3.1.1. Análisis de varianza para la concentración de polifenoles.....	47
3.1.2. Efectos individuales y combinados de los factores.....	48
3.1.3. Calidad del modelo estadístico y diagnóstico de regresión	50
3.1.4. Superficie de respuesta para condiciones óptimas	53

3.1.5. Predicción y optimización de condiciones experimentales.....	54
3.1.6 Resultados estimados para combinaciones experimentales	56
3.1.2. Evaluación del proceso de microencapsulado de <i>Sonchus oleraceus</i> L	59
3.1.3 Evaluación de la actividad antioxidante del extracto líquido y microencapsulado.....	64
3.2 Hipotesis.....	67
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
4.1. Conclusiones	69
4.2. Recomendaciones.....	70
Referencias bibliográficas.....	72
ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación taxonomía de <i>Sonchus oleraceus</i> L	5
Tabla 2 Clasificación de los polifenoles.....	9
Tabla 3 Equipos de laboratorio empleados en el proyecto de investigación.....	28
Tabla 4 Materiales fungibles de laboratorio empleados en el proyecto de investigación	29
Tabla 5 Reactivos de laboratorio empleados en el proyecto de investigación	30
Tabla 6 Análisis de varianza para la concentración de polifenoles	47
Tabla 7 Efectos estimados para la concentración de polifenoles	48
Tabla 8 Predicción y optimización de condiciones experimentales	54
Tabla 9 Concentración estimada de polifenoles según combinación experimental ..	56
Tabla 10 Resultados de concentración de polifenoles obtenidos por el método Soxhlet	58
Tabla 11 Resultados de la eficiencia del proceso de microencapsulación	59
Tabla 12 Resultados de la actividad antioxidante de <i>S. oleraceus</i> L por el método de DPPH.....	65
Tabla 13 Presentación de hipótesis.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Pareto estandarizado para concentración de polifenoles.....	50
Figura 2. Gráfica de efectos principales para la concentración de polifenoles.....	52
Figura 3. Superficie de respuesta estimada	53
Figura 4. Espectro FTIR del extracto líquido de hojas de <i>Sonchus oleraceus</i>	61
Figura 5. Espectro FTIR del microencapsulado de hojas de <i>Sonchus oleraceus</i>	62
Figura 6. Espectro FTIR de la mezcla polimérica (Maltodextrina y Goma arábica)	63
Figura 7. Espectros superpuestos del extracto, el microencapsulado y la mezcla polimérica.....	64

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Curva de ácido gálico.....	79
Anexo 2. Curva estándar de ácido gálico con agua	79
Anexo 3. Curva estándar de ácido gálico con etanol	80
Anexo 4. Curva estándar de Trolox para la evaluación de la capacidad antioxidante	80
Anexo 5. Proceso de homogenización para microencapsulación	81
Anexo 6. Eficiencia del microencapsulado en agua y etanol 96%	81
Anexo 7. Evaluación de la capacidad antioxidante por el método de DPPH	82

RESUMEN EJECUTIVO

La exploración de fuentes vegetales con valor nutricional y funcional ha cobrado relevancia en el desarrollo de productos con propiedades bioactivas. En este estudio, se trabajó con una planta subutilizada de uso comestible para evaluar la extracción, caracterización y microencapsulación de sus compuestos fenólicos, mediante técnicas adaptadas a matrices naturales. Se aplicó un diseño factorial que permitió analizar el efecto combinado de tres variables operativas: relación soluto/disolvente, tiempo de extracción y concentración de etanol. Los ensayos demostraron que condiciones específicas —una proporción de 1 en 15, 90 minutos y etanol al 30 por ciento— favorecieron una mayor concentración de polifenoles en el extracto obtenido. Este extracto fue posteriormente sometido a un proceso de secado por aspersión utilizando maltodextrina como encapsulante. Como parte de la propuesta técnica, se desarrolló una matriz en polvo de alta solubilidad (95,84 por ciento y baja higroscopicidad (7,23 por ciento), características deseables para aplicaciones alimentarias. La actividad antioxidante fue confirmada tanto en el extracto líquido como en el microencapsulado, con retención funcional adecuada después del proceso térmico. Los resultados obtenidos respaldan el uso tecnológico de esta especie vegetal en formulaciones de ingredientes funcionales; su potencial se vincula no solo a la cantidad de polifenoles extraídos, sino también a la estabilidad lograda mediante encapsulación, lo cual amplía sus aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica.

Palabras clave: *Sonchus oleraceus* L., Matriz encapsulante, Ultrasonido (UAE), secado por aspersión, Bioactivos naturales.

ABSTRACT

The present study investigated the extraction, characterization, and microencapsulation of polyphenols derived from *Sonchus oleraceus* L., a traditionally consumed but underutilized edible plant. A factorial design was applied to evaluate the effects of solute/solvent ratio, extraction time, and ethanol concentration on the recovery of phenolic compounds. Optimal conditions (1 in 15 ratio, 90 minutes, and 30 percent ethanol) yielded a high polyphenol content, confirming the relevance of solvent polarity and extraction kinetics. Following extraction, the liquid fraction was microencapsulated using spray-drying with maltodextrin as carrier agent. The resulting powder exhibited favorable physicochemical properties, including high solubility (95.84 percent) and low hygroscopicity (7.23 percent). Antioxidant activity was measured in both liquid and encapsulated extracts, showing acceptable retention after thermal processing. These findings support the feasibility of transforming *S. oleraceus* extracts into functional ingredients through microencapsulation, enabling their incorporation into food and nutraceutical formulations while preserving bioactivity and enhancing shelf-life.

Keywords: *Sonchus oleraceus* L, Encapsulating matrix, Ultrasound (UAE), spray drying, Natural bioactives.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Planteamiento del problema y justificación

Sonchus oleraceus L, conocida como canayuyo en Ecuador, es frecuentemente considerada una maleza invasora debido a su adaptabilidad genética y características morfológicas particulares (Guevara et al., 2024). Sin embargo, investigaciones recientes han resaltado que esta planta contiene metabolitos secundarios como polifenoles, flavonoides y taninos, conocidos por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Estos compuestos poseen alto valor para las industrias farmacéutica y alimentaria (Botella et al., 2024). A pesar de sus propiedades beneficiosas, el aprovechamiento del canayuyo sigue siendo limitado debido a la falta de estudios específicos sobre la optimización de sus procesos de extracción, un aspecto clave para maximizar su potencial terapéutico.

A nivel nacional, las investigaciones previas han evaluado distintas técnicas de extracción, como la maceración, Soxhlet y ultrasonido, observándose diferencias significativas en términos de rendimiento y costos energéticos (Coyago-Cruz et al., 2023). Adicionalmente, factores como la temperatura, el pH y la matriz vegetal afectan considerablemente el rendimiento de los metabolitos secundarios (Ivanović et al., 2020). Sin embargo, no se ha aplicado un diseño experimental robusto que permita optimizar estos procesos para condiciones locales, lo que subraya la necesidad de implementar metodologías como la superficie de respuesta (RSM) para garantizar una extracción más eficiente y sustentable (Aboulghazi et al., 2022).

Aunque el canayuyo crece sin dificultad en bordes de cultivos, márgenes de caminos y terrenos baldíos, pocas veces se lo considera materia prima con valor agregado. A pesar de que ya se ha demostrado su riqueza en compuestos bioactivos, el paso desde la evidencia científica hacia un proceso funcional no ha sido sistemático ni continuo; sigue faltando una estrategia que permita extraer, conservar y transformar sus metabolitos sin alterar su estructura ni perder eficiencia. La microencapsulación aparece como una herramienta interesante en este proceso; al proteger los polifenoles dentro de una matriz como la maltodextrina o la goma arábica, se evita su degradación frente a la luz, el oxígeno o el calor (**Herrera-Pool et al., 2022**). No basta con saber que tiene antioxidantes; hay que ver cómo ponerlos a disposición de otras aplicaciones, sin que pierdan lo que los hace especiales.

La idea no es extraer por extraer. Tampoco encapsular por moda. Se trata de lograr un procedimiento continuo, validado y ajustado a condiciones locales; uno que permita obtener compuestos con propiedades estables y reproducibles. Procesos como el “spray drying” han mostrado buenos resultados en otras especies vegetales con perfiles similares, permitiendo mantener la capacidad antioxidante durante semanas o incluso meses (**Espinosa-Sandoval et al., 2021**). Si se combina esta técnica con una optimización por superficie de respuesta, el rendimiento puede incrementarse sin elevar costos ni complejizar la operatividad. El canayuyo, en ese escenario, deja de ser una planta descartada para convertirse en una posibilidad concreta de innovación dentro de la biotecnología local.

La presente investigación se enfoca en abordar esta brecha mediante la evaluación comparativa de las técnicas de extracción mencionadas, utilizando la metodología de superficie de respuesta. Este enfoque permitirá determinar las condiciones óptimas para la obtención de polifenoles, con el objetivo de generar datos valiosos que impulsen la integración de esta planta en la industria ecuatoriana. Además, este estudio busca no solo validar las propiedades bioactivas del canayuyo, sino también proponer soluciones prácticas que se alineen con las demandas actuales del mercado y la sustentabilidad.

1.1.1 Generalidades

Sonchus oleraceus L pertenece a la familia Asteraceae (Grara & Guelmamene, 2022). Su raíz es cónica, alargada, a veces fusiforme, y da origen a un tallo hueco que varía del verde pálido al púrpura rojizo. Puede crecer hasta 1,5 metros, aunque en condiciones normales no supera los 100 cm (Sánchez et al., 2024). Las hojas tienen formas diversas; algunas son lanceoladas, otras elípticas, con lóbulos laterales y terminales de contorno triangular. Las inflorescencias se agrupan en corimbos, cada uno con pedúnculos de unos 5 cm y entre 80 y 250 flores amarillas de pequeño tamaño (Herrera et al., 2022).

Además, el ciclo de vida de esta planta es anual y muy rápido; en menos de tres meses puede pasar de semilla a floración. Esta característica ha contribuido a su expansión espontánea en zonas urbanas y agrícolas. La floración ocurre en racimos terminales que se abren de forma secuencial, generando un patrón continuo de polinización que atrae insectos nativos y mejora la biodiversidad local (Paredes et al., 2023). Su estructura anatómica y su rápido crecimiento han despertado interés para usos agroecológicos; como cobertura viva, puede controlar malezas competidoras y mejorar las condiciones del suelo sin demandar agroquímicos.

También resulta interesante su capacidad para adaptarse a suelos empobrecidos o con estrés hídrico. En estudios realizados con variedades silvestres de *Sonchus*, se ha reportado una alta eficiencia fotosintética incluso en condiciones de baja humedad y exposición solar intensa (Lozano et al., 2021). Esto convierte al canayuyo en una planta resistente y fácil de manejar, lo cual favorece su incorporación en sistemas de producción alternativos. Lejos de ser un estorbo agrícola, se perfila como una especie que combina rusticidad con riqueza fitoquímica; una combinación poco común.

1.1.2 Canayuyo (*Sonchus oleraceus* L)

1.1.2.1 Historia

Sonchus oleraceus L, conocida comúnmente canayuyo, cerraja, lechuga, cardo, achicoria o falso diente de león, se considerada una planta medicinal en más de 55 países (Kaundal et al., 2021). Originaria de Europa, África y Asia, se expandió rápidamente a otras regiones del mundo como América del Norte y Sur, India, China y sur Australia, debido a su adaptabilidad de crecer en diversos tipos de suelos y la resistencia a diferentes condiciones climáticas (Mohasib et al., 2020). Los registros históricos mencionan que se utiliza para tratar problemas digestivos y como una planta nutritiva en las épocas de escases.

El 80% de la población mundial considera que las plantas medicinales son la mejor fuente para proporcionar una variedad de compuestos orgánicos necesarios para el diseño de fármacos (Saxena & Kumar, 2020). En Ecuador, el canayuyo se ha integrado en la medicina tradicional ganando importancia como fuente potencial de compuestos bioactivos con aplicaciones farmacéuticas y agrícolas (Armijos et al., 2022). Tradicionalmente, es utilizada para tratar disfunción del sistema nervioso central, problemas digestivos como dolor de estómago, hepatitis e infecciones (Aissani et al., 2022).

A lo largo del tiempo, el canayuyo ha sido objeto de observación empírica en comunidades rurales que reconocen sus efectos sin necesidad de protocolos clínicos. Esa sabiduría popular, transmitida entre generaciones, coincide hoy con los hallazgos de la bioquímica moderna; por ejemplo, se ha identificado que sus extractos acuosos y etanólicos tienen efectos positivos sobre el sistema inmunológico, actuando como inmunomoduladores y bactericidas naturales (Rauf et al., 2023). Esta correspondencia entre uso tradicional y respaldo científico no solo valida su importancia etnobotánica;

también abre la puerta a su incorporación en biotecnologías emergentes, sin perder de vista su valor cultural.

Recientes estudios demostraron que la planta posee numerosas propiedades farmacológicas, incluyendo efectos como antioxidantes, antidiabética y antiinflamatoria (**Paniagua et al., 2020**). Entre sus compuestos bioactivos se encuentra flavonoides, fenoles, lactonas, saponinas, taninos, aceites esenciales, entre otros, los cuales respaldan su efectividad en el tratamiento de dolores de cabeza, reumatismo, además de tener propiedades ansiolíticas, antitumorales y antienvjecimiento. *Sonchus oleraceus* L, es una planta versátil con un gran potencial para aplicaciones medicinales y terapias complementarias (**Mohammed et al., 2020**).

1.1.2.2 Taxonomía

La clasificación de *Sonchus oleraceus* L (**Tabla 1**) se basa en una combinación de rasgos morfológicos y evidencia molecular. Entre sus características se destacan la presencia de látex blanco en tallos y hojas, inflorescencias con flores liguladas y un ciclo reproductivo acelerado. Estudios filogenéticos recientes han confirmado su cercanía genética con otras especies del mismo género, como *Sonchus asper* y *Sonchus arvensis*; estas tres conforman un grupo monofilético que comparte un ancestro común, lo que permite delimitar con mayor precisión sus relaciones evolutivas (**Guerrero, 2020**).

Tabla 1

Clasificación taxonomía de *Sonchus oleraceus* L

Categoría	Clasificación
Reino	Plantae

Categoría	Clasificación
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Género	<i>Sonchus</i>
Especie	<i>Sonchus oleraceus</i> L
Nombres comunes	Canayuyo, cerraja

Nota: *Sonchus oleraceus* L, pertenece al reino Plantae, dentro de la división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida. Se clasifica en el orden Asterales y la familia Asteraceae, siendo un género destacado por tener propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Información obtenida de **Guerrero., (2020)**.

1.1.2.3 Usos

Sonchus oleraceus L se ha mantenido presente tanto en prácticas tradicionales como en estudios experimentales contemporáneos. En la medicina ancestral, su uso como laxante suave, antiinflamatorio, diurético y protector hepático ha sido documentado por comunidades rurales y urbanas que aprovechan infusiones de sus hojas, tallos o raíces. Además, se le atribuyen efectos benéficos en el tratamiento de afecciones digestivas, renales y cutáneas; su inclusión en la dieta como verdura fresca también es común, sobre todo en preparaciones como sopas o ensaladas, debido a su contenido en vitamina A, C y E, así como hierro y calcio (**Nouidha et al., 2023**).

Desde el ámbito científico, esta planta ha despertado interés por su actividad antioxidante, antibacteriana y antifúngica. Sus extractos han mostrado eficacia frente

a cepas resistentes de bacterias y hongos, lo cual ha motivado investigaciones sobre su aplicación en farmacología y cosmética natural. También se evalúa su incorporación como fuente de polifenoles en suplementos alimenticios o como conservante vegetal, gracias a su capacidad de inhibir la oxidación lipídica y retardar el deterioro de productos procesados (**Bencheikh et al., 2021**). Estos usos combinan beneficios funcionales con bajo impacto ambiental, lo que resulta atractivo en líneas de producción más sostenibles.

Además, en la agricultura, se ha estudiado su efecto bioestimulante en cultivos de ciclo corto. Las infusiones fermentadas de *Sonchus oleraceus* L han mostrado resultados positivos al emplearse como fertilizante líquido, incrementando la disponibilidad de nutrientes en suelos degradados sin alterar la microbiota beneficiosa (**Espinoza et al., 2022**). Este tipo de aplicación puede ser valiosa en prácticas agroecológicas de pequeña escala, donde se prioriza el uso de insumos locales y biodegradables.

1.1.2.4 Composición

La composición química de *Sonchus oleraceus* L abarca un amplio espectro de metabolitos secundarios, entre los que destacan los polifenoles. Se han identificado ácidos fenólicos como el gálico, el cafeico y el gentísico; también flavonoides relevantes como la luteolina, la fisetina y la osthrutina. Estos compuestos se concentran tanto en las raíces como en las partes aéreas, y se asocian con una alta capacidad antioxidante. Según un estudio reciente, los valores totales pueden alcanzar hasta 195,25 µg/g en equivalentes de ácido gálico (GAE) (**Nouidha et al., 2023**), lo que indica un potencial elevado para aplicaciones antioxidantes en productos funcionales.

En cuanto a su composición nutricional, esta hierba contiene vitaminas y minerales esenciales para la dieta humana. Se han cuantificado niveles de vitamina C entre 250 y 779 mg/kg, además de calcio, hierro y fibra dietética en proporciones apreciables; esto refuerza su valor como alimento funcional y como insumo en dietas balanceadas (**Nouidha et al., 2023**). A ello se suma la presencia de aceites esenciales como trans-

cariofileno, limoneno y seselina, detectados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), que podrían contribuir a sus efectos antimicrobianos y aromáticos (Salim et al., 2023).

1.1.2 Polifenoles

1.1.3.1 Generalidades

Los polifenoles son compuestos bioactivos presentes de forma abundante en muchas especies vegetales. Se los reconoce como metabolitos secundarios que intervienen en la defensa natural de las plantas frente a condiciones de estrés biótico —como infecciones por hongos o bacterias— y abiótico —como sequías, salinidad o radiación UV. Se localizan comúnmente en frutos, semillas, hojas, flores y raíces; y su presencia influye en atributos sensoriales como el color intenso de una baya, el sabor amargo de una infusión o el aroma característico de ciertas hierbas. Desde el punto de vista químico, se caracterizan por presentar uno o más anillos aromáticos con grupos hidroxilo, lo que les permite neutralizar radicales libres con alta eficacia (Salim et al., 2023).

Además de su acción antioxidante, estos compuestos han sido relacionados con efectos beneficiosos en la salud humana. Su consumo regular, a través de dietas ricas en vegetales, se asocia con una disminución en la incidencia de enfermedades crónicas; entre ellas, se han documentado efectos positivos en la regulación de la glucemia, la reducción de procesos inflamatorios sistémicos y la modulación de señales celulares involucradas en la proliferación tumoral (Scalbert et al., 2022). No es casual que muchas dietas terapéuticas incluyan alimentos con alto contenido de polifenoles —como el té verde, el cacao o los frutos rojos—, pues estos compuestos participan activamente en procesos de reparación celular y detoxificación hepática.

1.1.3.2 Estructura y clasificación

Los polifenoles se caracterizan por presentar una o más estructuras cíclicas aromáticas —principalmente anillos bencénicos— unidos a varios grupos hidroxilo (-OH). Esta configuración molecular les otorga la capacidad de donar electrones, neutralizar especies reactivas de oxígeno y, por lo tanto, actuar como antioxidantes. Además, gracias a su estructura, pueden formar enlaces con proteínas, lípidos y metales; estas interacciones permiten regular procesos de señalización celular y modular respuestas inmunológicas o inflamatorias (González-Sarriás et al., 2021).

La clasificación de los polifenoles se basa principalmente en la complejidad de su estructura. Se dividen en compuestos simples, como los ácidos fenólicos, y en estructuras más complejas, como los flavonoides y taninos. Esta distinción considera el número de anillos aromáticos presentes y la disposición de los grupos funcionales; también influye el origen biosintético de cada molécula y su comportamiento químico en medios biológicos (Zagoskina et al., 2023). A continuación, se presenta en la **Tabla 2** un resumen con sus principales grupos:

Tabla 2

Clasificación de los polifenoles

Clasificación	Subclasificación
Ácidos fenólicos	Ácido hidroxibenzoico, ácido hidroxicinámico
Flavonoides	Flavonoles, isoflavonas, antocianinas, flavanonas, flavonas, flavonoles
Taninos	Taninos condensados, taninos hidrolizables

Nota: La información obtenida de (Zagoskina et al., 2023).

Además de esta clasificación básica, existen otras categorías menos exploradas, como los estilbenos (resveratrol) y lignanos, presentes en semillas y raíces de algunas plantas silvestres. Aunque su concentración es baja en comparación con los flavonoides, su actividad biológica ha sido reconocida por su influencia en la expresión genética de enzimas antioxidantes, lo cual amplía el espectro de acción de estos compuestos (**Martínez et al., 2022**). Su estudio se ha intensificado en los últimos años gracias al desarrollo de técnicas como HPLC y espectroscopía de masas.

1.1.3.3 Importancia

Los polifenoles se han convertido en una de las categorías más estudiadas dentro de los compuestos bioactivos vegetales. Su interés no radica únicamente en su estructura química, sino en su capacidad para intervenir en diversos procesos fisiológicos que favorecen el bienestar humano. Se ha documentado que estos compuestos pueden disminuir el riesgo de padecer enfermedades no transmisibles como la diabetes tipo 2, afecciones cardiovasculares, cáncer y trastornos neurodegenerativos; todo esto gracias a su acción antioxidante, antiinflamatoria y reguladora de vías metabólicas (**Truzzi et al., 2021**). Además, ejercen una influencia directa sobre la microbiota intestinal, al estimular el crecimiento de bacterias beneficiosas y contribuir al equilibrio de ecosistemas intestinales alterados.

Por su versatilidad funcional, los polifenoles están siendo cada vez más incorporados en productos alimenticios, suplementos nutricionales, fórmulas farmacéuticas y cosméticos de origen natural. Ya no se los considera aditivos secundarios; ahora son activos funcionales con propiedades bien documentadas. En la industria alimentaria, por ejemplo, se los utiliza como conservantes naturales que alargan la vida útil de ciertos productos sin recurrir a químicos sintéticos; en la cosmética, se valoran por su capacidad para neutralizar el envejecimiento oxidativo de la piel (**Ciupei et al., 2024**). Todo esto sin perder de vista su bajo nivel de toxicidad y su buena compatibilidad con sistemas biológicos.

1.1.3.4 Propiedades antioxidantes y bioactivas

Se destaca su alta actividad antioxidante debido a que tiene la capacidad para donar electrones y neutralizar radicales libres, evitando el daño oxidativo en lípidos, proteínas y ADN celular. Esta propiedad los convierte en agentes clave en la prevención del envejecimiento celular y de enfermedades crónicas. Además, los polifenoles presentan bioactividades complementarias como efectos antiinflamatorios, antimicrobianos, anticancerígenos y neuroprotectores. Estas acciones se relacionan con su capacidad para modular enzimas, inhibir señales proinflamatorias y activar vías de defensa antioxidante (El Gendy et al., 2024).

1.1.3 Métodos de extracción de polifenoles

1.1.4.1 Generalidades de extracción

Extraer polifenoles no es un procedimiento mecánico ni uniforme; se trata de una operación que depende de múltiples variables, como el tipo de matriz vegetal, el tamaño de partícula, la polaridad del solvente y la temperatura de trabajo. En términos simples, la extracción consiste en separar compuestos bioactivos de su entorno original—en este caso, las partes del *Sonchus oleraceus* L— para obtener una fracción rica en metabolitos secundarios. Este proceso permite aislar flavonoides, ácidos fenólicos y taninos sin alterar sus propiedades químicas, lo cual resulta indispensable para su aplicación posterior en alimentos, fármacos o cosméticos (Naczk & Shahidi, 2021).

1.1.4.2 Extracción Soxhlet

El método Soxhlet se considera una técnica de extracción semicontinua que ha sido ampliamente utilizada para aislar compuestos bioactivos a partir de matrices vegetales

secas. Su principio se basa en la recirculación cíclica de un disolvente caliente que pasa repetidamente a través del material vegetal triturado, lo que garantiza una transferencia progresiva de los metabolitos solubles hacia el disolvente. El aparato consta de un matraz con el disolvente, una cámara de extracción donde se coloca la muestra, y un condensador que enfría los vapores para retornar el disolvente al ciclo de reflujo (**López & Luque de Castro, 2020**).

Este sistema permite aprovechar al máximo el poder de disolución del solvente sin necesidad de agitación mecánica ni presión adicional; además, su funcionamiento automatizado facilita mantener condiciones constantes de temperatura durante todo el proceso. Sin embargo, uno de los inconvenientes más notorios del método Soxhlet es el uso prolongado de calor, lo cual puede degradar ciertos compuestos termosensibles como los flavonoides o algunos ácidos fenólicos. Por esta razón, se recomienda su uso con solventes relativamente volátiles como etanol, metanol o éter etílico, que puedan calentarse a bajas temperaturas sin perder su capacidad extractiva (**Gallego et al., 2022**).

En el caso del canayuyo (*Sonchus oleraceus* L), el método Soxhlet ofrece una alternativa viable para obtener extractos ricos en polifenoles, especialmente cuando se busca una comparación cuantitativa con otras técnicas. Aunque su rendimiento depende del tiempo de extracción y del tipo de solvente, se ha observado que puede recuperar una proporción considerable de compuestos fenólicos cuando se trabaja con etanol al 70 % durante ciclos de 4 a 6 horas (**Villalobos et al., 2021**). Este procedimiento será utilizado en la presente investigación como referencia dentro de los métodos convencionales, antes de aplicar técnicas más recientes como la extracción asistida por ultrasonido o microondas.

Además, la simplicidad del montaje y la disponibilidad de equipos Soxhlet en la mayoría de laboratorios de química orgánica permite estandarizar procesos sin necesidad de infraestructura costosa. Aunque no se considera un método ecológico por el consumo prolongado de solvente y energía, sigue siendo útil como técnica

comparativa para validar nuevos métodos que prometen mayor rendimiento con menor impacto ambiental (**Benavides et al., 2023**). Por eso, más que descartarlo, conviene integrarlo estratégicamente dentro del diseño experimental de extracción.

1.1.4.3 Extracción asistida por ultrasonidos

La extracción asistida por ultrasonidos (UAE, por sus siglas en inglés) se basa en la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia —generalmente entre 20 y 100 kHz— que atraviesan el medio líquido generando ciclos sucesivos de compresión y expansión. Estas fluctuaciones producen cavitación acústica, es decir, la formación y colapso de microburbujas en el disolvente. Al colapsar, las burbujas liberan energía suficiente para romper las paredes celulares del tejido vegetal, facilitando así la salida de los metabolitos presentes en el interior de la célula, como los polifenoles (**Kumar et al., 2020**).

Este método ha demostrado ser especialmente eficaz para matrices vegetales ricas en compuestos termosensibles, ya que puede operar a temperaturas relativamente bajas; eso reduce la degradación térmica de los polifenoles durante el proceso. A diferencia del método Soxhlet, UAE requiere menos disolvente, menos tiempo y consume menos energía. Además, se adapta con facilidad a diferentes tipos de disolventes, lo que permite ajustar la polaridad del medio según el tipo de metabolito deseado. Algunos estudios han reportado incrementos del 30 al 50 % en el rendimiento extractivo cuando se emplea ultrasonido frente a métodos tradicionales (**Chemat et al., 2022**).

En el caso del canayuyo (*Sonchus oleraceus* L), la UAE se convierte en una opción atractiva por su capacidad de extraer flavonoides, ácidos fenólicos y taninos sin alterar su estructura bioactiva. Se ha observado que el uso de ultrasonido a 40 kHz durante 30 minutos, con etanol acuoso al 70 %, logra concentraciones comparables a las del método Soxhlet, pero en un tiempo cinco veces menor (**Zhou et al., 2021**). Esta eficiencia no solo favorece el ahorro de recursos; también permite preservar la

actividad antioxidante original del extracto, un aspecto clave para su aplicación en productos funcionales.

Otra ventaja relevante es su escalabilidad. A pesar de que comenzó como una técnica experimental de laboratorio, hoy existen sistemas industriales que integran ultrasonido en procesos de extracción a gran escala, especialmente en la industria alimentaria y farmacéutica. Esta posibilidad de ampliación convierte a la UAE en una tecnología viable para producir extractos estandarizados a partir de especies vegetales locales. En el presente estudio, se utilizará esta técnica para comparar su eficiencia frente a otros métodos, evaluando no solo la cantidad extraída, sino también la calidad fitoquímica del producto final (Rodríguez-Pérez et al., 2023).

1.1.4 Cuantificación de metabolitos secundarios (polifenoles) de canayuyo (*Sonchus oleraceus* L)

Cuantificar los metabolitos secundarios presentes en el canayuyo no es solo un paso técnico; es una condición indispensable para validar la eficacia de los métodos de extracción aplicados. Los polifenoles, por su complejidad estructural y variedad de subgrupos, requieren técnicas específicas que permitan estimar su concentración total de forma reproducible. El método más utilizado para este tipo de análisis es el ensayo colorimétrico de Folin-Ciocalteu, una técnica que reacciona con los grupos hidroxilo presentes en los compuestos fenólicos, generando un color azul intenso que se mide mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 765 nm (Singleton et al., 1999).

Este procedimiento permite expresar la concentración de polifenoles totales en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto seco (mg GAE/g). Aunque es un método sencillo y accesible, tiene ciertas limitaciones; por ejemplo, puede reaccionar con otros compuestos reductores como la vitamina C, lo que podría generar una sobreestimación del resultado. Para minimizar ese margen de error, es

habitual realizar un análisis previo de la composición del extracto, complementando con otras técnicas como HPLC (High Performance Liquid Chromatography) cuando se desea identificar polifenoles específicos en mezclas complejas (**Ignat et al., 2011**).

En el caso de *Sonchus oleraceus* L, se espera encontrar una concentración alta de polifenoles, sobre todo en las hojas jóvenes y en las inflorescencias, donde suelen concentrarse los compuestos más bioactivos. Además del ensayo de Folin-Ciocalteu, también se evaluarán las propiedades antioxidantes del extracto mediante pruebas de capacidad reductora (FRAP) y secuestro de radicales libres (DPPH), con el fin de correlacionar la cantidad total de polifenoles con su actividad funcional. Estas pruebas permitirán establecer si hay una relación directa entre el método de extracción, la cantidad de polifenoles obtenidos y el potencial antioxidante del extracto final (**Pisoschi & Pop, 2015**).

1.1.5.1 Método de Folin-Ciocalteu

El método de Folin–Ciocalteu es una técnica colorimétrica ampliamente utilizada para estimar la cantidad total de polifenoles presentes en extractos vegetales. Su principio se basa en la oxidación de los grupos hidroxilo fenólicos por parte del reactivo de Folin, que contiene una mezcla de ácidos fosfomolibdico y fosfotúngstico. Esta reacción genera una coloración azul intensa, cuya intensidad es directamente proporcional a la concentración de compuestos fenólicos en la muestra (**García et al., 2015 ; Lawag et al., 2023**). La absorbancia de la solución se mide a una longitud de onda de 765 nm mediante espectrofotometría, utilizando agua destilada como blanco.

Para el análisis cuantitativo, se prepara una curva de calibración con ácido gálico a diferentes concentraciones, ya que este compuesto sirve como referencia para expresar los resultados en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (mg GAE/g). Las muestras vegetales se preparan disolviendo el extracto en un solvente adecuado —generalmente etanol o metanol acuoso—, y luego se mezclan con

el reactivo de Folin y una solución alcalina, como carbonato de sodio. Tras un tiempo de incubación de 30 minutos en oscuridad, se realiza la lectura espectrofotométrica. El análisis se replicará tres veces para asegurar la reproducibilidad de los datos (**Muszy et al., 2022**).

Aunque se trata de un método accesible y práctico, es importante tener en cuenta sus limitaciones. El reactivo de Folin–Ciocalteu también puede reaccionar con otros compuestos reductores presentes en el extracto, como el ácido ascórbico o ciertos azúcares, lo que puede provocar una ligera sobreestimación de la cantidad real de polifenoles. Por esta razón, algunos estudios complementan este método con análisis cromatográficos, especialmente cuando se requiere identificar los compuestos específicos que contribuyen al total fenólico (**Sánchez-Rangel et al., 2013**). Sin embargo, para propósitos comparativos entre métodos de extracción, esta técnica es adecuada, reproducible y suficientemente precisa.

1.1.5 Optimización del Proceso de Extracción

Optimizar un proceso de extracción no es simplemente buscar el mayor rendimiento; se trata de encontrar un equilibrio entre cantidad, calidad y eficiencia. En el caso de los polifenoles presentes en *Sonchus oleraceus* L, este proceso permite ajustar las condiciones experimentales para obtener compuestos bioactivos en concentraciones altas, sin comprometer su integridad molecular. Al mismo tiempo, permite reducir tiempos, consumo de solventes y energía, lo cual hace más viable su aplicación a nivel productivo.

La optimización implica analizar cómo interactúan variables como la temperatura, el tiempo, la relación sólido-líquido, el tipo de solvente y la frecuencia ultrasónica, en el caso de la UAE. Estas variables no actúan de forma aislada; se afectan mutuamente.

Por eso, se emplean metodologías estadísticas como el diseño de experimentos (DOE) y la superficie de respuesta (RSM), que permiten construir modelos matemáticos capaces de predecir el comportamiento del sistema y de identificar las combinaciones de parámetros que maximizan el rendimiento fenólico (Aboulghazi et al., 2022).

1.1.6.1 Método de superficie de respuesta (RSM) aplicado a la extracción

La superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) es una técnica estadística multivariable utilizada para modelar y optimizar procesos en los que intervienen varias variables independientes que influyen sobre una o más respuestas deseadas. Este método permite construir modelos predictivos a partir de un conjunto reducido de experimentos, lo cual facilita identificar las combinaciones más eficientes de factores operativos. Su uso es común en estudios de ingeniería química, biotecnología, farmacología y procesamiento de alimentos, donde se requiere comprender cómo interactúan múltiples parámetros simultáneamente (Brzezińska et al., 2023).

En procesos de extracción vegetal, la RSM ha demostrado ser eficaz para estimar condiciones óptimas que maximicen el rendimiento de compuestos bioactivos como los polifenoles. Esta metodología considera variables independientes como la relación sólido/líquido, el tiempo de extracción, la temperatura o la concentración del disolvente, y permite correlacionarlas con respuestas cuantificables como la concentración total de polifenoles, la eficiencia del proceso o la actividad antioxidante del extracto. Los modelos obtenidos son expresados generalmente mediante ecuaciones cuadráticas, que permiten visualizar superficies tridimensionales y curvas de nivel ; estas representaciones facilitan la toma de decisiones técnicas sin necesidad de recurrir a un número excesivo de pruebas experimentales.

Uno de los aportes más valorados de la RSM es su capacidad para revelar efectos de interacción entre variables. En muchas situaciones, cambiar una sola condición no

produce un impacto notable; sin embargo, la combinación precisa de dos o más factores puede generar un efecto sinérgico, elevando considerablemente el rendimiento. Además, al tratarse de una herramienta estadística validada, los resultados pueden someterse a pruebas de ajuste como ANOVA y coeficientes de determinación, lo cual refuerza la fiabilidad de las conclusiones obtenidas (**Khoddami et al., 2021**).

1.1.6.2 Evaluación de parámetros óptimos para maximizar el rendimiento y estabilidad de los polifenoles

Evaluar los parámetros que influyen sobre la extracción de polifenoles es un paso esencial para garantizar no solo un alto rendimiento, sino también la estabilidad estructural de los compuestos extraídos. Entre los factores más relevantes se encuentran la temperatura, el tiempo de extracción, el tipo y concentración del solvente, el pH del medio y la proporción sólido-líquido. Ajustar cada uno de estos elementos permite mejorar la liberación de los metabolitos sin provocar su degradación térmica, oxidativa o química (**Díaz et al., 2021**).

La temperatura, por ejemplo, cumple una doble función; acelera la difusión del soluto desde el tejido vegetal al disolvente, pero también puede favorecer reacciones indeseadas como la oxidación de grupos fenólicos o la ruptura de enlaces funcionales. De igual forma, el tiempo de extracción debe ser suficiente para alcanzar el equilibrio, pero sin prolongarse innecesariamente, ya que una exposición prolongada puede reducir la actividad antioxidante de los compuestos extraídos. Por eso, la evaluación de parámetros no busca solo extraer más; busca extraer mejor.

El tipo de solvente también marca una diferencia sustancial. Solventes polares como el etanol o el metanol, en concentraciones acuosas, son comúnmente utilizados para extraer polifenoles debido a su capacidad para disolver compuestos con múltiples

grupos hidroxilo. No obstante, la elección del solvente también debe considerar aspectos como su toxicidad, biodegradabilidad y compatibilidad con la aplicación final del extracto. La concentración del solvente modifica su polaridad efectiva, lo cual influye en la solubilidad diferencial de los compuestos presentes en la matriz vegetal (Ignat et al., 2011).

Otro parámetro crítico es el pH, que puede modificar la ionización de los grupos funcionales de los polifenoles, afectando tanto su solubilidad como su estabilidad frente a la oxidación. Un pH ligeramente ácido suele ser favorable para preservar la estructura química de la mayoría de los ácidos fenólicos y flavonoides. Finalmente, la proporción sólido-líquido determina la concentración de compuestos en el disolvente; una relación demasiado alta puede saturar el sistema, mientras que una relación demasiado baja desperdicia solvente sin mejorar el rendimiento. Optimizar todos estos parámetros de manera simultánea permite obtener extractos con propiedades funcionales estables y reproducibles (Sasidharan et al., 2022).

1.1.6 Microencapsulación

1.1.7.1 Generalidades

La microencapsulación es una técnica que consiste en recubrir partículas pequeñas de compuestos activos con una matriz protectora, con el propósito de aislarlos del entorno y controlar su liberación. Este proceso se aplica a ingredientes en estado líquido, sólido o incluso gaseoso, utilizando materiales de recubrimiento compatibles con aplicaciones alimentarias o farmacéuticas. Entre los más utilizados se encuentran la gelatina, la maltodextrina, la goma arábiga, el almidón modificado, y algunos lípidos como la parafina o las ceras vegetales (Choudhury et al., 2021; García et al., 2024). El tamaño de las microcápsulas generadas suele estar entre 1 y 100 micrómetros, aunque puede variar según la técnica empleada.

A nivel industrial, se han desarrollado múltiples métodos de encapsulación, que incluyen la atomización o "spray drying", la coacervación, la emulsificación y la extrusión. La elección del método depende de factores como la naturaleza del compuesto activo, el uso final del producto y la capacidad tecnológica disponible. Entre todas estas técnicas, la atomización ha ganado popularidad por su facilidad de escalado, bajo costo y compatibilidad con matrices termolábiles cuando se controlan adecuadamente las condiciones del proceso (**Bakry et al., 2016**). Además, permite obtener polvos secos estables, fáciles de manipular y con buena dispensabilidad.

La microencapsulación ha sido utilizada con éxito en compuestos fenólicos provenientes de frutas, hierbas aromáticas y residuos agroindustriales. En estos casos, no solo mejora la estabilidad antioxidante, sino que también facilita la incorporación de dichos compuestos en productos donde, de otro modo, serían inestables o poco solubles. Gracias a esta tecnología, es posible convertir extractos líquidos poco manejables en ingredientes funcionales con mayor vida útil, mejor biodisponibilidad y mejor aceptación sensorial (**Calatayud et al., 2022**). Así, se transforma un extracto vegetal en un insumo versátil, con posibilidad de uso en diversos sectores productivos.

1.1.7.2 Microencapsulación mediante secado por aspersión

El secado por aspersión, conocido también como *spray drying*, es una técnica ampliamente utilizada para microencapsular compuestos bioactivos sensibles a la luz, al oxígeno o a la temperatura. El procedimiento consiste en atomizar una emulsión o suspensión que contiene el compuesto activo y el material encapsulante en una corriente de aire caliente. A medida que las microgotas descienden en la cámara de secado, el disolvente se evapora rápidamente, dando lugar a partículas sólidas en forma de polvo fino. Este método permite transformar líquidos inestables en productos secos y estables con propiedades funcionales conservadas (**Ferreira et al., 2022**).

La maltodextrina es uno de los agentes encapsulantes más utilizados en esta técnica debido a su buena solubilidad en agua, baja higroscopicidad y capacidad para formar estructuras amorfas que encapsulan eficazmente los compuestos fenólicos. Además, puede combinarse con otros materiales como la goma arábiga, la inulina o las proteínas de suero, mejorando la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa del producto final. Esta técnica se ha utilizado con éxito en la encapsulación de aceites esenciales, extractos herbales, probióticos, pigmentos naturales y antioxidantes, conservando tanto su funcionalidad como sus características sensoriales (**Tran et al., 2020**).

El principal atractivo del secado por aspersión radica en su escalabilidad y bajo costo operativo. A diferencia de otras técnicas, como la coacervación o la liofilización, el spray drying permite operar en condiciones controladas con tiempos de secado muy cortos —a menudo inferiores a 10 segundos—, lo que reduce la exposición térmica de los compuestos sensibles. Además, las microcápsulas obtenidas presentan buena fluidez, estabilidad durante el almacenamiento y facilidad de incorporación en diferentes matrices alimentarias o farmacéuticas (**Mahdi et al., 2021**).

Sin embargo, su eficacia depende del control riguroso de variables como la temperatura de entrada y salida, el flujo del aire, la viscosidad de la solución y la proporción entre el núcleo y el agente encapsulante. Estos factores influyen directamente en la morfología, el tamaño y la estabilidad de las microcápsulas. Cuando estos parámetros se ajustan adecuadamente, se obtiene un polvo fino de aspecto uniforme, con alta eficiencia de encapsulación y excelente capacidad de dispersión en agua o medios alimentarios líquidos (**Tonon et al., 2022**). Por eso, el secado por aspersión sigue siendo una de las herramientas más utilizadas para transformar extractos naturales en ingredientes funcionales de alta calidad.

1.1.7.3 Ventajas de microencapsulado mediante secado por aspersión

El secado por aspersión se ha consolidado como una técnica eficiente para microencapsular compuestos bioactivos en matrices sólidas de origen alimentario o farmacéutico. Su principal ventaja radica en su capacidad para proteger sustancias sensibles como los polifenoles, preservando su estructura y su actividad biológica frente a factores externos como el calor, la luz o el oxígeno. Esta protección garantiza la funcionalidad del compuesto encapsulado a lo largo del almacenamiento y durante su incorporación en diferentes productos (**Zanoni et al., 2020**).

Además, esta técnica se adapta con facilidad a procesos de gran escala. El diseño del equipo permite producir grandes volúmenes de microcápsulas en condiciones controladas, con tiempos de secado muy cortos y costos operativos relativamente bajos. La homogeneidad en el tamaño de partícula facilita su manipulación industrial, ya que los polvos obtenidos presentan buena fluidez, estabilidad y facilidad para mezclarse con otros ingredientes sólidos o líquidos (**Ferreira et al., 2022**).

Otra ventaja destacable es la mejora en la solubilidad de compuestos poco hidrosolubles. El secado por aspersión convierte extractos líquidos difíciles de formular en polvos secos que se dispersan con facilidad en medios acuosos, lo que a su vez incrementa su biodisponibilidad en aplicaciones orales. Esto es especialmente útil en nutraceuticos o suplementos donde se requiere que el ingrediente activo tenga buena absorción intestinal (**Tran et al., 2020**).

Aparte de su eficiencia técnica, esta técnica permite conservar características organolépticas valiosas como el aroma y el sabor, especialmente cuando se trabaja con extractos herbales o aceites esenciales. El uso de encapsulantes como maltodextrina, goma arábica o inulina ayuda a mejorar la estabilidad oxidativa, controlar la liberación del compuesto activo y reducir la interacción con el entorno. Todo esto convierte al

secado por aspersión en una alternativa viable para transformar extractos inestables en ingredientes funcionales versátiles y de larga duración (**Tonon et al., 2022**).

1.1.7.4 Microencapsulación de compuestos polifenólicos

La microencapsulación de compuestos polifenólicos se ha convertido en una estrategia eficaz para preservar su estabilidad estructural y funcional frente a condiciones ambientales desfavorables. Estos compuestos, ampliamente reconocidos por sus propiedades antioxidantes y sus beneficios en la prevención de enfermedades degenerativas, son sensibles a la oxidación, la luz y la humedad. Al ser encapsulados, se forma una barrera física que impide su degradación prematura, lo cual prolonga su vida útil y mantiene su eficacia durante el procesamiento y almacenamiento (**da Silva Júnior et al., 2023**).

Uno de los aportes más valiosos de esta técnica es la posibilidad de diseñar sistemas de liberación controlada. En lugar de liberar el polifenol de forma inmediata, las microcápsulas pueden ser formuladas para reaccionar ante estímulos como el pH, la temperatura o enzimas específicas, permitiendo que los compuestos activos se liberen de forma sostenida en el sitio de absorción deseado —por ejemplo, en el intestino delgado o el colon—. Esta propiedad mejora la absorción de los polifenoles y aumenta su biodisponibilidad, especialmente cuando se emplean en aplicaciones nutracéuticas y farmacológicas (**Galanakis et al., 2020**).

Además, la microencapsulación facilita la incorporación de estos compuestos en matrices alimentarias sin comprometer la calidad sensorial del producto final. En muchos casos, los polifenoles poseen sabores amargos o astringentes que pueden afectar la aceptación del consumidor. El encapsulado permite enmascarar estas características indeseadas, permitiendo su uso en jugos, yogures, barras energéticas o suplementos sin alterar el sabor, el color o la textura de los alimentos procesados (**Reboredo-Rodríguez et al., 2021**). Esta versatilidad ha generado un interés creciente

en el desarrollo de ingredientes funcionales basados en extractos vegetales encapsulados.

1.1.7 Evaluación de la actividad antioxidante

1.1.8.1 Generalidades

La actividad antioxidante permite observar cómo ciertos compuestos son capaces de inhibir procesos de oxidación que, en muchos casos, alteran la estructura de biomoléculas esenciales. Este tipo de medición no solo es útil en el laboratorio; también tiene implicaciones en el desarrollo de productos con aplicaciones funcionales. La idea es sencilla pero poderosa; proteger, retrasar o bloquear reacciones de oxidación causadas por especies reactivas del oxígeno. En los extractos vegetales, esta capacidad no es constante; varía según la composición, la forma de interacción con los radicales libres y las propiedades fisicoquímicas de cada molécula presente (Silvestrini et al., 2023).

Dicha variabilidad también responde a factores como el tipo de planta, la técnica de extracción y el grado de pureza del compuesto. Un extracto no es solo una suma de sustancias; es un sistema dinámico que contiene flavonoides, ácidos fenólicos y taninos en proporciones variables. Algunos actúan como donadores de electrones, otros como quelantes de metales. Estas diferencias generan mecanismos de acción distintos, aunque complementarios. Por eso, evaluar la actividad antioxidante permite inferir su potencial para atenuar procesos como el estrés oxidativo, relacionado con daños celulares, inflamación y ciertas enfermedades degenerativas (Salehi et al., 2020).

Lo interesante del método DPPH es que no requiere condiciones extremadamente complejas. Basta con mezclar el extracto con la solución del radical, esperar unos

minutos y registrar la disminución de absorbancia. Este cambio es proporcional a la actividad antioxidante del compuesto en estudio. Se trata de una técnica sensible, rápida y ampliamente validada para evaluar extractos vegetales, aceites esenciales o compuestos puros. Además, ofrece una buena aproximación al comportamiento antioxidante de una sustancia en sistemas biológicos, aunque siempre debe complementarse con otros ensayos para obtener una visión más completa (**Baliyan et al., 2022 ; Gulcin & Alwaseel, 2023**).

1.1.8.2 Ensayo de la capacidad antioxidante (DPPH)

El ensayo DPPH, también conocido como 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo, es una técnica sencilla y eficaz para medir la capacidad antioxidante de compuestos fenólicos. Funciona sobre una lógica clara; cuando un antioxidante dona un electrón o un átomo de hidrógeno al radical DPPH, este se reduce, generando un cambio de color visible —de violeta intenso a amarillo pálido—. Ese cambio puede cuantificarse espectrofotométricamente midiendo la absorbancia en el rango de 517 a 520 nm, lo que permite estimar el nivel de actividad antioxidante de la muestra analizada (**Shimamura et al., 2014**).

Entre sus principales ventajas se destacan la rapidez del procedimiento, su bajo costo y su capacidad para aplicarse a una amplia variedad de matrices. Esto lo convierte en una herramienta estándar para investigaciones que involucran extractos vegetales, alimentos funcionales o compuestos sintetizados de forma natural. A diferencia de otros métodos, el DPPH no requiere condiciones estrictas de temperatura o pH; basta con preparar la solución del radical, mezclarla con el extracto y medir la variación de color en un periodo de 20 a 30 minutos. Esta facilidad operativa ha permitido su adaptación en laboratorios con equipamientos básicos y en estudios más avanzados con sistemas automatizados (**Baliyan et al., 2022**).

En estudios más recientes, el ensayo DPPH ha sido empleado también para caracterizar extractos naturales utilizados en síntesis verde de nanopartículas. La reacción entre los

polifenoles y el radical libre permite, además de evaluar su capacidad antioxidante, explorar su potencial como agentes reductores en procesos de biofabricación. Esta doble aplicación —biológica y tecnológica— ha ampliado su uso en estudios interdisciplinarios que integran fitoquímica, nanotecnología y ciencia de materiales (Martínez-Cabanas et al., 2021).

1.1.8.3 Aplicaciones de los polifenoles en la industria alimentaria y farmacéutica

Los polifenoles, por su actividad antioxidante, antimicrobiana y antiinflamatoria, se han convertido en ingredientes atractivos para diversas industrias. En la alimentaria, se los utiliza como conservantes naturales que ayudan a prolongar la vida útil de los productos sin recurrir a aditivos sintéticos. Este uso no solo responde a la demanda por productos más saludables; también mejora la estabilidad de compuestos sensibles, especialmente en alimentos grasos o altamente procesados. Por ejemplo, se ha observado que los extractos polifenólicos son capaces de inhibir la oxidación lipídica en carnes y embutidos, reduciendo el deterioro sensorial y químico durante el almacenamiento (Sun et al., 2024).

Además, su incorporación no se limita a productos cárnicos. Se los ha utilizado con buenos resultados en aceites vegetales, productos de panadería, salsas, bebidas funcionales, e incluso en envases comestibles activos, donde aportan una función antioxidante directa. Este tipo de aplicaciones también tiene impacto en la formulación de productos destinados a grupos poblacionales específicos, como alimentos funcionales para personas con enfermedades metabólicas. El uso de polifenoles permite enriquecer el perfil nutricional sin alterar significativamente el sabor o la textura del alimento, especialmente cuando se aplican mediante técnicas como la microencapsulación o la emulsificación (López-Gómez et al., 2023).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Optimizar el proceso de extracción de compuestos polifenólicos microencapsulados procedentes del canayuyo (*Sonchus oleraceus* L).

1.2.2 Objetivos específicos

- Extraer metabolitos secundarios de *Sonchus oleraceus* L por los métodos de Soxhlet y extracción asistida con ultrasonidos.
- Estabilizar los metabolitos secundarios (polifenoles) extraídos de *Sonchus oleraceus* L aplicando la técnica de microencapsulación mediante secado por aspersión.
- Evaluar la actividad antioxidante del extracto líquido y microencapsulado de *Sonchus oleraceus* L.

1.3 Hipótesis científica

- Si se aplica el método de extracción asistida por ultrasonido seguido de la microencapsulación por secado por aspersión, entonces mejorará la estabilidad y actividad antioxidante de los polifenoles extraídos de *Sonchus oleraceus* L.

1.4 Variables

1.4.1 Variables dependientes

- **Respuesta experimental:** Concentración de polifenoles totales (mg GAE/g)

1.4 Variables independientes

- **Factor A: Relación soluto/disolvente:** 1:15 (−1), 1:20 (0) y 1:25 (+1).
- **Factor B: Tiempo de extracción:** 30 min (−1), 60 min (0) y 90 min (+1).
- **Factor C: Disolvente (etanol):** 30% (−1), 50% (0) y 70% (+1).

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

El desarrollo de este proyecto experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Unidad de Docencia, Investigación y Desarrollo en Ingeniería de los Alimentos (UODIDE), perteneciente a la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. En este espacio, se realizaron las fases correspondientes a la preparación del material vegetal, extracción de polifenoles, microencapsulación por secado por aspersión y evaluación de la actividad antioxidante.

Para asegurar la calidad y reproducibilidad de los resultados, se utilizaron equipos de laboratorio calibrados y en condiciones óptimas de funcionamiento. Asimismo, se dispuso de materiales fungibles y reactivos analíticos adecuados para los métodos empleados. Las **Tablas 3, 4 y 5** detallan los equipos, insumos y sustancias químicas utilizadas durante todo el proceso experimental.

Tabla 3

Equipos de laboratorio empleados en el proyecto de investigación

Equipos	Marca	Modelo	Cantidad
Deshidratador convección	por Smart Heat	541650.1	1
Balanza analítica	OHAUS	Adventurer-Pro model AV264C	1
Plancha calefactotora	VWR	97042-682	1
Balanza de humedad	KERN	MLS 50-3	1

Espectrofotómetro	Fisher Scientific	ACCUSKSN GO	1
Baño ultrasónico	Brason	CPX2800H	1
Rotaevaporador	IKA	RV8	1
Refrigeradora	Indurama	N2BE8U	1

El deshidratador se utilizó para reducir la humedad del canayuyo antes de la molienda; la balanza de humedad permitió verificar este valor con precisión. El espectrofotómetro y el baño ultrasónico fueron esenciales durante la etapa de análisis y extracción; mientras que el rotaevaporador se empleó para concentrar los extractos antes del microencapsulado.

Tabla 4

Materiales fungibles de laboratorio empleados en el proyecto de investigación

Materiales Fungible	Cantidad
Vasos de precipitación (50 mL)	9
Matraces Erlenmeyer (250 mL)	6
Probeta (50 – 100 mL)	1
Balones de aforo (10mL – 100 mL)	1
Placa de 96 pocillos	2
Micropipetas (10 – 100 µL, 20 – 200 µL, 100 – 1000 µL)	1
Caja de puntas (10 – 100 µL, 20 – 200 µL, 100 – 1000 µL)	1
Tubos eppendorf	27
Tubos falcón	9
Papel aluminio	1
Papel filtro	1
Paquete de fundas Ziploc	1
Gradilla	2

Embudo de vidrio	1
Agitador de vidrio	1
Frascos ámbar de (50 mL, 500 mL)	27
Espátula	1

Los frascos ámbar fueron especialmente útiles para proteger los extractos y reactivos de la luz; mientras que las micropipetas y la placa de 96 pocillos fueron fundamentales para las lecturas espectrofotométricas durante la cuantificación de polifenoles y la evaluación antioxidante.

Tabla 5

Reactivos de laboratorio empleados en el proyecto de investigación

Materiales	Cantidad
Etanol al 96%	5 L
Agua destilada	5 L
Reactivo de Folin - Ciocalteu	10 mL
Solución de carbonato de sodio	7 g
Solución de Ácido Gálico	0,0111 g
Solución madre Trolox	0,0120 g
Maltodextrina	200 g
2,2-difenil-1-picrilhidrazilo o DPPH	1 g

Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico, y se prepararon las soluciones siguiendo protocolos establecidos. El etanol se usó como disolvente para la extracción de polifenoles; el reactivo de Folin-Ciocalteu y el carbonato de sodio fueron necesarios para la cuantificación polifenólica total. Por su parte, el DPPH y la solución estándar de Trolox se emplearon en la evaluación de la capacidad antioxidante del extracto y el encapsulado.

2.2. Métodos

2.2.1. Extracción de metabolitos secundarios de *Sonchus oleraceus* L por los métodos de Soxhlet y extracción asistida con ultrasonidos.

Para la extracción de compuestos polifenólicos presentes en *Sonchus oleraceus* L, se empleó el método de extracción asistida por ultrasonido (UAE, por sus siglas en inglés). Esta técnica fue seleccionada por su eficiencia en la ruptura de estructuras celulares mediante cavitación acústica, lo que facilitó la liberación de metabolitos fenólicos en condiciones controladas de tiempo, temperatura y solvente.

La aplicación del método UAE respondió a un diseño factorial 3^3 , que contempló tres factores: tiempo de extracción, concentración del disolvente (etanol/agua) y relación soluto/disolvente. Estos parámetros se evaluaron simultáneamente para optimizar la obtención del extracto, sin comprometer la estabilidad de los compuestos termoestables.

El proceso se realizó utilizando un baño ultrasónico con frecuencia de 40 kHz y potencia de 200 W. El material vegetal pulverizado fue dispersado en soluciones hidroetanólicas previamente preparadas, y sometido a tratamientos de agitación ultrasónica durante tiempos establecidos. Posteriormente, los extractos fueron filtrados al vacío, concentrados a baja presión en un rotaevaporador y conservados en frascos ámbar a 4 °C hasta su análisis.

El método Soxhlet es una técnica tradicional de tipo semicontinuo; permite recircular un disolvente caliente a través de una muestra vegetal molida, concentrando los metabolitos solubles mediante ciclos repetidos de reflujo y condensación (López & Luque de Castro, 2020). Aunque presenta ciertas limitaciones por el uso prolongado de calor, permite una extracción completa del contenido fenólico cuando se controla adecuadamente el tiempo y la concentración del solvente.

En cambio, la extracción asistida por ultrasonido se basa en la cavitación acústica generada por ondas ultrasónicas de alta frecuencia que atraviesan el disolvente. Esta cavitación induce la formación y colapso de microburbujas, lo que provoca la ruptura mecánica de las paredes celulares del material vegetal, facilitando la liberación de compuestos bioactivos en un tiempo mucho menor que el requerido por métodos térmicos (**Chemat et al., 2022**). UAE se ha utilizado ampliamente para matrices ricas en polifenoles, ya que permite extraer compuestos sensibles sin degradarlos, y utilizando menor cantidad de solvente y energía.

Ambos procedimientos se realizaron bajo condiciones controladas. Para el Soxhlet, se empleó etanol al 30 % como solvente, y se mantuvo el reflujo por 6 horas continuas. En el caso de UAE, se usó el mismo disolvente en un baño ultrasónico con frecuencia de 40 kHz durante 35 minutos, con temperatura no superior a 40 °C. Las muestras extraídas fueron posteriormente concentradas por rotaevaporación al vacío para ser almacenadas en frascos ámbar a 4 °C hasta su análisis.

2.2.1.1. Obtención del material vegetal

El material vegetal se recolectó manualmente en zonas periurbanas del cantón Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador, donde *Sonchus oleraceus* L crece de forma espontánea durante todo el año. La recolección se realizó en horas de la mañana, seleccionando plantas jóvenes y saludables, sin signos de daño físico o infección. Se optó por esta etapa fenológica debido a su mayor concentración de compuestos fenólicos, en especial flavonoides y ácidos hidroxicinámicos (**Nouidha et al., 2023**).

Una vez recolectadas, las plantas fueron transportadas en fundas plásticas ventiladas hacia la Unidad Operativa de la Dirección de Investigación y Desarrollo (UOIDE) de la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, donde se llevó a cabo la selección de las partes aéreas de *Sonchus oleraceus* L —principalmente hojas

y tallos jóvenes—que fueron dispuestas en bandejas de acero inoxidable para retirar el exceso de agua acumulada entre el material vegetal.

2.2.1.2. Preparación de material vegetal

Las hojas frescas de *Sonchus oleraceus* L fueron seleccionadas manualmente, descartando aquellas con daños visibles, presencia de insectos o alteraciones fúngicas. Posteriormente, se realizó un lavado cuidadoso con agua destilada para eliminar partículas de tierra, microorganismos y cualquier impureza superficial. Este proceso se realizó en dos etapas: un enjuague inicial por inmersión y una segunda fase con agua corriente destilada.

Siguiendo una metodología adaptada de **González et al. (2022)**, las hojas fueron sometidas a un proceso de secado artificial en un deshidratador de convección a 40 °C durante 48 horas continuas. Esta temperatura permitió reducir la humedad sin alterar los compuestos polifenólicos, los cuales son sensibles a la degradación térmica por encima de 60 °C. Una vez secas, las muestras fueron trituradas en un molino de cuchillas, obteniendo un polvo homogéneo que se tamizó con una malla de tamaño inferior a 1 mm con la criba del molino, con el fin de estandarizar el tamaño de la partícula y facilitar la eficiencia del proceso de extracción.

La muestra pulverizada se almacenó en bolsas Ziploc herméticas, protegidas de la luz y la humedad, a temperatura ambiente, en un espacio fresco y seco. Esta condición de almacenamiento permitió preservar la integridad de los metabolitos hasta su procesamiento, reduciendo el riesgo de oxidación o hidrólisis espontánea (**Ivanović et al., 2020**).

2.2.1.3. Diseño experimental

Para evaluar la influencia de los parámetros de extracción sobre la concentración de polifenoles totales, se empleó un diseño factorial completo 3^3 , el cual consideró tres factores independientes con tres niveles cada uno. Los factores analizados fueron: relación sólido/líquido (1:15, 1:20 y 1:25 g/mL), tiempo de extracción (30, 60 y 90 minutos) y concentración de etanol como disolvente (30 %, 50 % y 70 %).

Este diseño factorial permitió estudiar no solo los efectos individuales de cada variable, sino también las interacciones entre ellas. Se realizaron tres réplicas por tratamiento, alcanzando un total de 81 experimentos, lo que garantizó la robustez estadística del análisis. La variable dependiente evaluada fue la concentración total de polifenoles extraídos, expresada como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (mg GAE/g).

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el software *Statgraphics*, versión gratuita, mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM). Esta técnica estadística permitió modelar el comportamiento del sistema, identificar condiciones óptimas y visualizar las curvas de interacción entre variables, facilitando así la interpretación de los resultados (Brzezińska et al., 2023).

2.2.1.4. Extracción de compuestos polifenólicos

La extracción de compuestos polifenólicos a partir de matrices vegetales como *Sonchus oleraceus* L exigió condiciones operativas que facilitaran la liberación de estos metabolitos sin alterar su integridad química. Dado que los polifenoles son susceptibles a la degradación por acción del calor, la luz y el oxígeno, se priorizó una técnica que permitiera preservar su estructura durante el proceso extractivo.

En esta investigación se utilizó la **extracción asistida por ultrasonido (UAE)** como único método experimental, por su capacidad para romper las paredes celulares y favorecer la liberación de metabolitos secundarios mediante el fenómeno de cavitación acústica. Esta técnica ha demostrado ser eficaz en la recuperación de compuestos fenólicos termoestables, además de requerir menos volumen de solvente y tiempos más cortos que los métodos convencionales (**Chemat et al., 2022**).

La UAE se aplicó utilizando solventes hidroetanólicos en distintas concentraciones, bajo un diseño factorial 3^3 en el que se evaluaron tres variables operativas: la proporción soluto/disolvente, el tiempo de extracción y la concentración del disolvente (etanol al 30 %, 50 % y 70 %). Para cada tratamiento, se mezcló un volumen definido del solvente con una cantidad constante de material vegetal seco, y la mezcla se sometió a ultrasonido a temperatura ambiente durante el tiempo estipulado en el diseño experimental (**López & Luque de Castro, 2020**).

Los extractos obtenidos fueron filtrados para eliminar sólidos no solubles y posteriormente almacenados en frascos ámbar a 4 °C, protegidos de la luz y el oxígeno hasta su análisis. Esta metodología permitió garantizar la estabilidad de los compuestos polifenólicos durante las etapas previas a su cuantificación y evaluación antioxidante (**Gajić et al., 2019**).

2.2.1.4.1. Extracción por método de ultrasonido (UAE)

La extracción asistida por ultrasonido se llevó a cabo con base en la metodología descrita por **Maher et al. (2021)**, incorporando modificaciones específicas según los parámetros definidos en el diseño experimental. Esta técnica se fundamenta en la generación de cavitación ultrasónica, la cual favorece la ruptura de las paredes celulares vegetales, facilitando la liberación de compuestos polifenólicos al medio líquido.

Se prepararon mezclas del material vegetal seco con soluciones hidroetanólicas al 30 %, 50 % y 70 %, respetando las relaciones sólido/líquido de 1:15, 1:20 y 1:25 g/mL. La mezcla fue transferida a matraces Erlenmeyer sellados con papel aluminio para evitar pérdidas por evaporación. Estos matraces fueron colocados en un baño ultrasónico con una frecuencia constante de 40 kHz, operando con pulsos de potencia intercalados y temperatura controlada de 30 °C.

La duración del proceso varió entre 30, 60 y 90 minutos, dependiendo del tratamiento correspondiente. Al finalizar cada extracción, los matraces fueron retirados del baño, enfriados a temperatura ambiente, y el contenido fue filtrado al vacío utilizando papel filtro de porosidad media, conjuntamente se centrifugó las muestras obteniendo un extracto limpio y claro. El extracto líquido resultante fue recogido en frascos ámbar y conservado a 4 °C hasta su posterior análisis de polifenoles totales y evaluación antioxidante (Gajić et al., 2019).

2.2.1.4.2. Extracción por método de Soxhlet

La extracción mediante el sistema Soxhlet se utilizó como técnica comparativa para la obtención de compuestos polifenólicos a partir del material vegetal seco de *Sonchus oleraceus* L. Esta técnica, aunque más prolongada que otros métodos contemporáneos, permitió una recuperación continua del extracto gracias a la recirculación automática del disolvente bajo condiciones de reflujo. El principio operativo se basó en la transferencia térmica cíclica, lo que favoreció la liberación progresiva de metabolitos solubles desde matrices vegetales con bajo contenido de humedad y paredes celulares resistentes (López & Luque de Castro, 2020).

Para ejecutar el procedimiento, se pesaron 5 gramos del polvo vegetal previamente tamizado, que fueron introducidos en un cartucho de celulosa ubicado dentro de la cámara del extractor Soxhlet. Esta unidad se acopló a un matraz que contenía 150 mL de etanol al 30 %, seleccionado por su polaridad intermedia y su compatibilidad con

productos destinados a la industria alimentaria y farmacéutica. El montaje se completó con un condensador vertical, que permitió la condensación continua del vapor de etanol, devolviendo el disolvente a la cámara de extracción mediante un ciclo cerrado.

El proceso se llevó a cabo durante 6 horas, manteniéndose la temperatura de trabajo próxima al punto de ebullición del etanol (alrededor de 40 °C). Cada ciclo de recolección se generó cada 8 a 10 minutos, según la eficiencia del sistema de condensación. Durante el reflujo, el disolvente caliente disolvió los compuestos fenólicos de la muestra vegetal, los cuales se acumularon paulatinamente en el matraz inferior.

Concluida la extracción, se permitió el enfriamiento total del sistema antes del desmontaje. El extracto crudo se filtró al vacío para eliminar residuos sólidos y luego se concentró utilizando un rotaevaporador a presión reducida, manteniendo la temperatura por debajo de los 45 °C, con el objetivo de preservar los metabolitos térmicamente sensibles. El concentrado resultante fue envasado en frascos ámbar herméticos y conservado a 4 °C hasta su análisis posterior de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante **(Silvestrini et al., 2023)**.

Este método se empleó como referencia operativa para contrastar la eficiencia de extracción con otras técnicas más modernas, manteniendo condiciones controladas y repetibles a lo largo del procedimiento **(Benavides et al., 2021)**.

2.2.1.5. Determinación de sólidos solubles totales (SST)

La determinación de los sólidos solubles totales (SST) permite estimar la concentración de compuestos extraídos en forma líquida, aportando información clave sobre la eficiencia del proceso de extracción. En este estudio, los extractos obtenidos

de *Sonchus oleraceus* L fueron sometidos a este análisis como paso previo a la cuantificación de metabolitos específicos.

Primero, se midió el contenido de humedad presente en una alícuota representativa del extracto mediante una balanza de humedad, la cual opera por pérdida de masa controlada bajo condiciones térmicas constantes. Este dato fue fundamental para calcular el porcentaje de sólidos solubles totales, a través de la siguiente Ecuación 1:

$$\%SST = 100\% - \%Humedad$$

Ecuación 1. Determinación de sólidos totales.

A continuación, con el valor obtenido de SST y el volumen total del extracto, se procedió al cálculo de la masa neta de sólidos extraídos, que representa la cantidad real de compuestos solubles transferidos desde el material vegetal al disolvente:

$$Sólidos\ extraídos(g) = \frac{Volumen\ del\ extracto \times \%SST}{100}$$

Ecuación 2. Determinación de la masa de sólidos extraídos.

Para evaluar la eficiencia del proceso, se calculó el rendimiento de extracción. Este se expresó como el porcentaje de masa sólida obtenida respecto a la masa seca inicial del material vegetal tratado en cada réplica:

$$\%rendimiento\ de\ extracción = \left(\frac{Sólidos\ extraídos\ (g)}{Peso\ inicial\ de\ la\ muestra\ (g)} \right) \times 100$$

Ecuación 3. Determinación del rendimiento de la extracción.

De acuerdo con **Bin et al. (2024)**, la combinación de estos tres parámetros —SST, masa de sólidos extraídos y rendimiento— constituye una forma confiable y reproducible de evaluar la eficiencia global en la extracción de metabolitos bioactivos desde matrices vegetales.

2.2.1.6. Cuantificación de metabolitos secundarios

Para determinar el contenido de polifenoles totales en los extractos de *Sonchus oleraceus* L, se utilizó el método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, una técnica ampliamente validada que permite estimar la concentración de compuestos fenólicos mediante la formación de un complejo azul intenso. Esta reacción de oxidación-reducción se desarrolla entre los grupos hidroxilo fenólicos presentes en la muestra y los complejos fosfomolibdico-fosfotúngstico del reactivo de Folin, los cuales se reducen en condiciones alcalinas generando una señal colorimétrica proporcional a la concentración total de polifenoles.

La metodología fue adaptada del protocolo descrito por **Muszyńska et al. (2022)**, con ligeras modificaciones para adecuarse a las condiciones de análisis en microplaca de 96 pocillos. En cada ensayo se pipetearon 10 µL del extracto previamente filtrado y diluido, 130 µL de agua destilada, 10 µL del reactivo Folin–Ciocalteu, y tras un reposo de seis minutos, se añadieron 100 µL de una solución de carbonato de sodio al 7 %. La mezcla fue incubada durante 90 minutos a temperatura ambiente en oscuridad, asegurando así el desarrollo completo de la reacción cromógena.

Las lecturas de absorbancia se realizaron en un espectrofotómetro UV-Vis a 765 nm. Los resultados fueron calculados mediante interpolación en una curva de calibración construida con soluciones estándar de ácido gálico **Anexo 1** (0 a 100 mg/mL), alcanzando un coeficiente de correlación $R^2 = 0.998$, lo que garantizó la linealidad del modelo. Los valores fueron expresados en mg equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (mg GAE/g).

Los resultados muestran una adecuada homogeneidad entre repeticiones, con desviaciones estándar por debajo de 0.18. Este nivel de precisión valida tanto el procedimiento como la estabilidad del extracto. La metodología aplicada es ampliamente reconocida como una herramienta efectiva en el estudio fitoquímico de matrices vegetales, debido a su sensibilidad frente a los metabolitos del tipo fenólico, tal como afirman **García Martínez et al. (2015)** y **Lawag et al. (2023)**.

2.2.1.6.1. Determinación de polifenoles totales

Para estimar el contenido total de polifenoles (TPC) en los extractos de *Sonchus oleraceus* L, se utilizó el ensayo colorimétrico de Folin–Ciocalteu, basado en la capacidad antioxidante de los compuestos fenólicos para reducir el reactivo de Folin, generando un complejo azul medido por espectrofotometría UV-Visible.

El procedimiento se adaptó del protocolo de **Sari et al. (2023)** y se ejecutó en microplacas de 96 pocillos con el fin de optimizar recursos y reducir el tiempo de análisis. En cada pocillo se colocaron 10 µL del extracto vegetal, 130 µL de agua destilada y 10 µL del reactivo de Folin–Ciocalteu. Luego de seis minutos de reposo en condiciones oscuras, se añadieron 100 µL de carbonato de sodio al 7 % y se dejó reposar durante 90 minutos a temperatura ambiente.

La absorbancia fue registrada a una longitud de onda de 765 nm en un espectrofotómetro UV-Vis; como blanco se utilizó una mezcla preparada sin extracto. Para la cuantificación, se construyó una curva de calibración a partir de soluciones patrón de ácido gálico con concentraciones entre 0 y 100 mg/mL. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (mg GAE/g).

Cada análisis fue realizado por triplicado, calculándose los promedios y desviaciones estándar correspondientes. Este método resultó adecuado para la matriz vegetal analizada, mostrando buena sensibilidad y repetibilidad, en concordancia con lo reportado por **Martins et al. (2021)** y **García Martínez et al. (2015)**, quienes destacan su aplicabilidad en estudios fitoquímicos.

Para transformar los valores de concentración en contenido real dentro del extracto, se aplicó la siguiente ecuación:

$$TPC = \frac{c \times V}{m}$$

Ecuación 4. Contenido total de polifenoles en la muestra seca.

Donde:

- V = Volumen de disolvente de extracción (mL)
- m = peso de la muestra seca utilizada (g)
- c = concentración de la muestra (mg/mL)

2.2.1.7 Análisis estadístico

Para procesar los resultados experimentales se utilizó el software *Statgraphics*, en su versión libre. Con esta herramienta se construyó un diseño factorial completo 3³, que permitió analizar simultáneamente tres factores independientes con tres niveles cada uno [...]; estos fueron: relación sólido/líquido, tiempo de extracción y porcentaje de etanol.

La variable de respuesta seleccionada fue la concentración total de polifenoles expresada en mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (mg GAE/g). Este diseño no solo permitió identificar combinaciones óptimas [...]; también reveló interacciones entre los factores evaluados. Como criterio de confiabilidad

estadística se utilizó un nivel de significancia de $p < 0,05$, con el fin de discriminar las variaciones reales de aquellas atribuibles al azar [...]; tal como se recomienda en investigaciones similares, según **González-Soto et al. (2022)**.

A partir del diseño obtenido, se generaron el modelo de superficie de respuesta que permitieron visualizar las condiciones bajo las cuales se maximiza la recuperación de polifenoles [...]; esta información fue decisiva para establecer las condiciones experimentales posteriores.

2.2.2 Estabilización de los metabolitos secundarios (polifenoles) extraídos de *Sonchus oleraceus* L aplicando el método de microencapsulación mediante secado por aspersión.

Según los resultados del análisis estadístico, se eligió el tratamiento más adecuado para la obtención eficiente del extracto líquido de *Sonchus oleraceus* L, a mayor escala. Este tratamiento se empleó siguiendo la metodología detallada en el apartado 2.2.1.4 extracción de compuestos polifenólicos. Una vez que se obtuvo el extracto, se utilizó el rotaevaporador a una temperatura de 60 °C, con una velocidad de 235 rpm durante 4 h para evaporar el disolvente (etanol) obteniendo una muestra más pura del extracto líquido. Tras la evaporación, se almacenó en frascos ámbar a 4 °C para evitar cualquier tipo de degradación de los bioactivos, tal como lo sugiere **(Bennoour et al., 2020)**. Esta etapa de almacenamiento fue crucial para garantizar estabilidad de los compuestos bioactivos extraídos.

2.2.2.1 Microencapsulación de polifenoles mediante secado por aspersión

La microencapsulación de los compuestos polifenólicos extraídos de *Sonchus oleraceus* L, se realizó aplicando la técnica de secado por aspersión, con el fin de

obtener un polvo fino formado por microesferas que recubrirían los compuestos bioactivos. Para ello, se preparó una solución compuesta por maltodextrina y goma arábiga en una proporción de 20:80 en la que el extracto actúa como la sustancia activa y el agente encapsulante como la sustancia protectora (**Ardena, 2021**). Se utilizó una plancha de calentamiento y agitación para homogenizar 69,01 g mezcla del polímero junto con 182,17 ml de agua destilada y 100 mL del extracto líquido a una temperatura de 40 °C, adicional para garantizar una mezcla homogénea de los componentes, utilizó un homogeneizador lo cual permitió la dispersión uniforme del polímero y el extracto vegetal, asegurando la completa disolución de la maltodextrina y goma arábiga en la solución acuosa (Anexo 5).

Durante el proceso de microencapsulación de los compuestos bioactivos presentes en el extracto de *Sonchus oleraceus* L, se utilizó un equipo BÜCHI Mini Spray Dryer B-290, cuyas condiciones operativas fueron a temperatura de entrada del aire caliente de 150 °C, lo cual favorece la rápida evaporación del solvente sin generar una exposición prolongada del material sensible al calor. Mientras que, la temperatura de salida alcanzó los 101 °C, indicando una buena eficiencia de secado con bajo contenido de humedad en el producto final (**Navarro-Flores et al., 2020**).

Estas condiciones permitieron optimizar la obtención del microencapsulado, conservando los compuestos bioactivos y asegurando un buen rendimiento del producto final para facilitar su posterior análisis. El polvo se almacenó en un recipiente hermético evitando el contacto con la luz y la humedad. Las microesferas se caracterizaron por la eficiencia de encapsulación por el método espectrofotométrico por medio de la cuantificación aplicando el método de Folin-Ciocalteu. El ensayo se efectuó para determinar la eficiencia del proceso de encapsulación de los compuestos polifenólicos extradidos de *Sonchus oleraceus* L. Por lo tanto, la microencapsulación aseguró la protección y liberación gradual del polifenol, mejorando la vida y la disponibilidad biológica del polifenol (**Bińkowska et al., 2024**).

2.2.2.2 Determinación cuantitativa de eficiencia de la microencapsulación

Para eficiencia de la microencapsulación del extracto, se llevó a cabo un ensayo en el cual se realizó una dilución de 1/10 del microencapsulado en agua y en etanol 96% para evaluar los compuestos totales y superficiales (**Miranda et al, 2023**). La muestra se centrifugó a 3400 rpm durante 5 min lo que permitió separar los componentes del microencapsulado (**Martinić et al., 2022**), permitiendo obtener los datos de la absorbancia de las dos muestras medidas en el espectrofotómetro, de tal manera que se calculó la eficiencia del microencapsulado aplicando la Ecuación 6:

$$EM\% = \frac{C_{Agua} - C_{Etanol}}{C_{Agua}} \times 100$$

Ecuación 6. Calculo para obtener eficiencia del microencapsulado.

Donde:

- $EM\%$ = Eficiencia de la microencapsulación
- C_{Agua} = Concentración de polifenoles en agua
- C_{Etanol} = Concentración de polifenoles en etanol

2.2.2.3. Determinación cualitativa de eficiencia de la microencapsulación

La eficiencia cualitativa se evaluó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT – IR). Este análisis se llevó a cabo en un rango espectral 500 a 4000 cm^{-1} , lo que permitió caracterizar las estructuras moleculares y las interacciones entre los compuestos (**Martinić et al., 2022**). Para el análisis, se prepararon muestras del extracto concentrado y el microencapsulado. Estas se colocan en el equipo FT-IR, que genera el espectro mostrando las bandas correspondientes a los grupos funcionales de los polifenoles. En la muestra microencapsulada, se esperan cambios en la intensidad y desplazamiento de las bandas, lo que indica interacciones entre los polifenoles y el

material encapsulante, como los puentes de hidrógeno entre los grupos O-H de los polifenoles y el encapsulante.

2.2.3. Evaluación de la actividad antioxidante del extracto líquido y microencapsulado de *Sonchus oleraceus* L

El análisis de la actividad antioxidante de *Sonchus oleraceus* L, se llevó a cabo utilizando el extracto líquido como el microencapsulado con la mayor concentración de polifenoles totales, según lo determinado en el análisis estadístico.

2.2.3.1. Curva de calibración para el análisis de la actividad antioxidante

Se elaboró una curva de calibración utilizando Trolox en un rango 50 a 500 µmol/L. Para el blanco, se empleó 180 µL de metanol junto con 20 µL de agua destilada. En el caso del control, se utilizó 180 µL del reactivo DPPH y 20 µL de agua destilada. Para la muestra, se empleó 180 µL de DPPH con 20 µL de la muestra. Cada análisis se realizó por triplicado y los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición de la muestra y la actividad equivalente a Trolox (µM/L). El cálculo se realizó utilizando la Ecuación 7 descrita por el autor.

$$\%Inhibición = \left[1 - \left(\frac{A_{muestra} - A_{Blanco}}{A_{control} - A_{Blanco}} \right) \right] \times 100$$

Ecuación 7. Cálculo del porcentaje de inhibición.

En donde:

- $A_{muestra}$ = Absorbancia de la muestra
- $A_{control}$ = Absorbancia del control
- A_{blanco} = Absorbancia de blanco

(Noori et al., 2022)

2.2.3.2. Análisis de la actividad antioxidante de los polifenoles empleando el método DPPH (2,2 diphenil-1-1-picrylhdrazil)

Para el análisis de la actividad antioxidante del extracto y el microencapsulado, se aplicó la metodología propuesta por **Bobo-Garcia et al., (2015)**, con algunas modificaciones. El procedimiento consistió en utilizar una placa de 96 pocillos, en la cual se añadió 20 μ L del extracto o el microencapsulado diluido junto con 180 μ L de una solución de DPPH preparada en una mezcla de metanol y agua (80:20) a una concentración de 0,0059 mg en 100 mL del disolvente. Se homogenizó la mezcla durante 1 minuto y se llevó a incubación en la microplaca durante 45 minutos en un lugar oscuro a temperatura ambiente. Posteriormente, se midió la absorbancia de la muestra en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 515 nm (Anexo 7) (**Pazmiño et al., 2022**).

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Análisis de varianza para la concentración de polifenoles

La extracción de metabolitos polifenólicos desde *Sonchus oleraceus* L fue evaluada a través de un diseño factorial 3³. El análisis de varianza permitió determinar qué factores individuales y combinados influyeron sobre la concentración de polifenoles totales (mg GAE/g de muestra seca), dichos valores se determinaron a partir de la curva de calibración presentada en el Anexo 1. La Tabla 6 muestra los resultados del ANOVA.

Tabla 6

Análisis de varianza para la concentración de polifenoles

Fuente	SC	gl	CM	F	p
Relación Soluta/Disolvente	392.823	1	392.823	229.39	0.0000
Tiempo de extracción	38.2874	1	38.2874	22.36	0.0000
Disolvente	6.65356	1	6.65356	3.89	0.0526
AA	17.2135	1	17.2135	10.05	0.0022
AB	21.203	1	21.203	12.38	0.0008
BC	22.572	1	22.572	13.18	0.0005
Bloques	15.0294	2	7.51468	4.39	0.0159
Error total	123.297	72	1.71246		

Fuente	SC	gl	CM	F	p
Total corregido	637.08	80			

Los resultados mostraron que la relación soluto/disolvente fue el factor más influyente ($p = 0.0000$), seguido del tiempo de extracción ($p = 0.0000$). El tipo de disolvente, aunque mostró un leve efecto, no fue estadísticamente significativo ($p = 0.0526$), lo cual se interpreta como una tendencia, pero no una diferencia concluyente. También se identificaron interacciones relevantes: AB (relación $\times$ tiempo) y BC (tiempo $\times$ disolvente), ambas con $p < 0.001$.

3.1.2. Efectos individuales y combinados de los factores

Tabla 7

Efectos estimados para la concentración de polifenoles

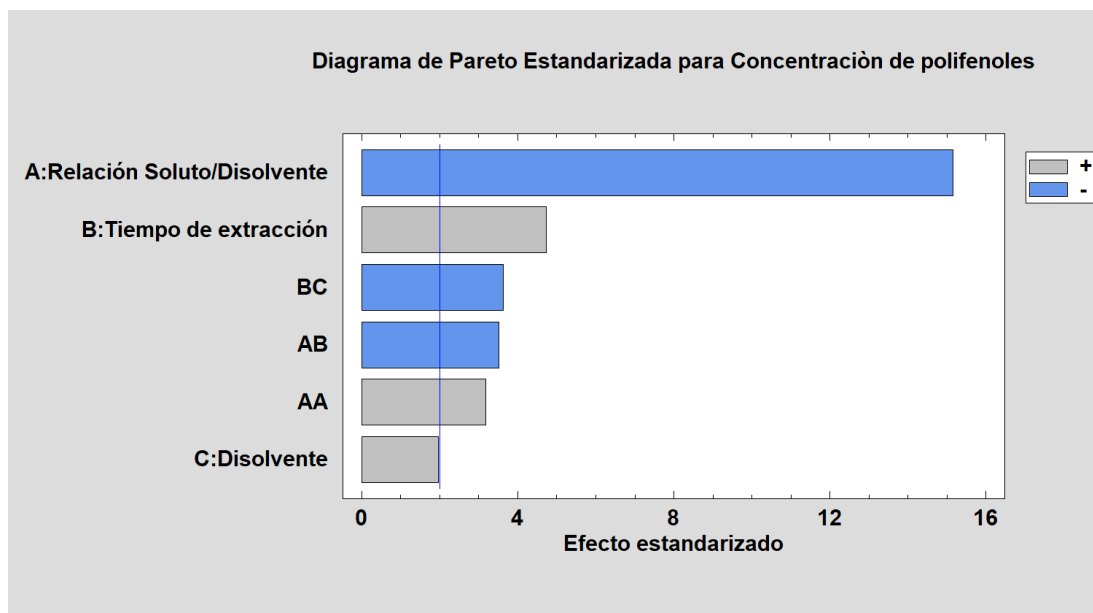
Efecto	Estimado	Error estándar	VIF
Promedio	6.4660	0.2518	–
Relación Soluta/Disolvente	–5.3943	0.3562	1.0
Tiempo de extracción	+1.6841	0.3562	1.0
Disolvente	+0.7020	0.3562	1.0
AA (cuadrática A)	+1.9558	0.6169	1.0
AB (interacción A $\times$ B)	–1.5349	0.4362	1.0
BC (interacción B $\times$ C)	–1.5837	0.4362	1.0

Los efectos estimados para cada una de las variables analizadas y sus combinaciones se detallan en la Tabla 7. En el caso del solvente agua destilada, la eficiencia de extracción fue determinada utilizando la curva estándar presentada en el Anexo 2, mientras que para el solvente etanol se utilizó la curva mostrada en el Anexo 3. De forma notoria, la relación soluto/disolvente arrojó un efecto negativo de -5.39 , lo cual refleja que una mayor dilución del material vegetal reduce la concentración de polifenoles extraídos. Es decir, a menor proporción de disolvente por gramo de muestra, mayor es la eficacia del proceso. Por su parte, el tiempo de extracción se comportó de manera positiva ($+1.68$), indicando que extensiones temporales en el tratamiento favorecen la liberación de compuestos fenólicos. La eficiencia de extracción se calculó utilizando las curvas estándar en agua y etanol (ver Anexos 2 y 3, respectivamente).

El porcentaje de etanol, aunque con un efecto positivo de menor magnitud ($+0.70$), no alcanza un peso suficiente para impactar la variable respuesta de forma concluyente. En cuanto a las interacciones, se evidencian efectos negativos en AB (relación $\times$ tiempo) y BC (tiempo $\times$ disolvente), lo que apunta a que los factores no siempre actúan de forma acumulativa. La interacción cuadrática AA exhibió un valor positivo ($+1.95$), lo cual sugiere un leve comportamiento curvilíneo respecto al aumento de la relación soluto/disolvente.

Figura 1. Diagrama de Pareto estandarizado para concentración de polifenoles

Diagrama de Pareto estandarizado para concentración de polifenoles



Este patrón de comportamiento se refleja con claridad en el Diagrama de Pareto estandarizado (ver Figura 1), donde la relación soluto/disolvente destaca como el efecto más influyente sobre la concentración de polifenoles, superando el umbral de significancia estadística. El tiempo de extracción y las interacciones BC, AB y AA también sobrepasan el límite de referencia, aunque con menor intensidad. El porcentaje de disolvente (C), en cambio, queda por debajo del umbral, lo que sugiere un impacto menos relevante en el modelo.

3.1.3. Calidad del modelo estadístico y diagnóstico de regresión

El modelo de superficie de respuesta ajustado a los datos experimentales logró explicar una proporción considerable de la variabilidad total de la concentración de polifenoles. Específicamente, el coeficiente de determinación $R^2 = 80.64 \%$ indica que la mayoría de la variación observada puede atribuirse a los efectos considerados en el diseño:

relación soluto/disolvente (A), tiempo de extracción (B), disolvente (C) y sus interacciones cuadráticas y bilineales (AA, AB, BC).

Según el reporte del sistema estadístico (StatAdvisor), seis efectos resultaron estadísticamente significativos ($p < 0.05$), lo que indica que estos factores tienen un impacto real sobre la respuesta y no son producto del azar. El cuadrado medio del error fue 1.712, valor que se utilizó para calcular la razón-F en cada caso, con lo cual se determinó que los efectos A, B, AB, BC y AA tienen un peso cuantificable en la respuesta.

Además del análisis de varianza, se evaluaron métricas de ajuste y precisión del modelo:

- **Error estándar del estimado:** 1.3086
- **Error medio absoluto (MAE):** 0.9607
- **Estadístico de Durbin-Watson (DW):** 1.129

Estos valores muestran que los residuos del modelo presentan una ligera autocorrelación positiva, lo que sugiere la posibilidad de patrones secuenciales en la dispersión de los datos. Aunque el valor de DW está por debajo del umbral deseable de 2.0, esto no invalida el modelo; más bien invita a revisar la distribución de residuos en futuros análisis o considerar un ordenamiento aleatorio de las réplicas.

Por otro lado, la ecuación ajustada del modelo fue:

$$Y = 20.2407 - 1.7971A + 0.1964B + 0.0967C + 0.0391A^2 - 0.0051AB - 0.0013BC$$

Donde:

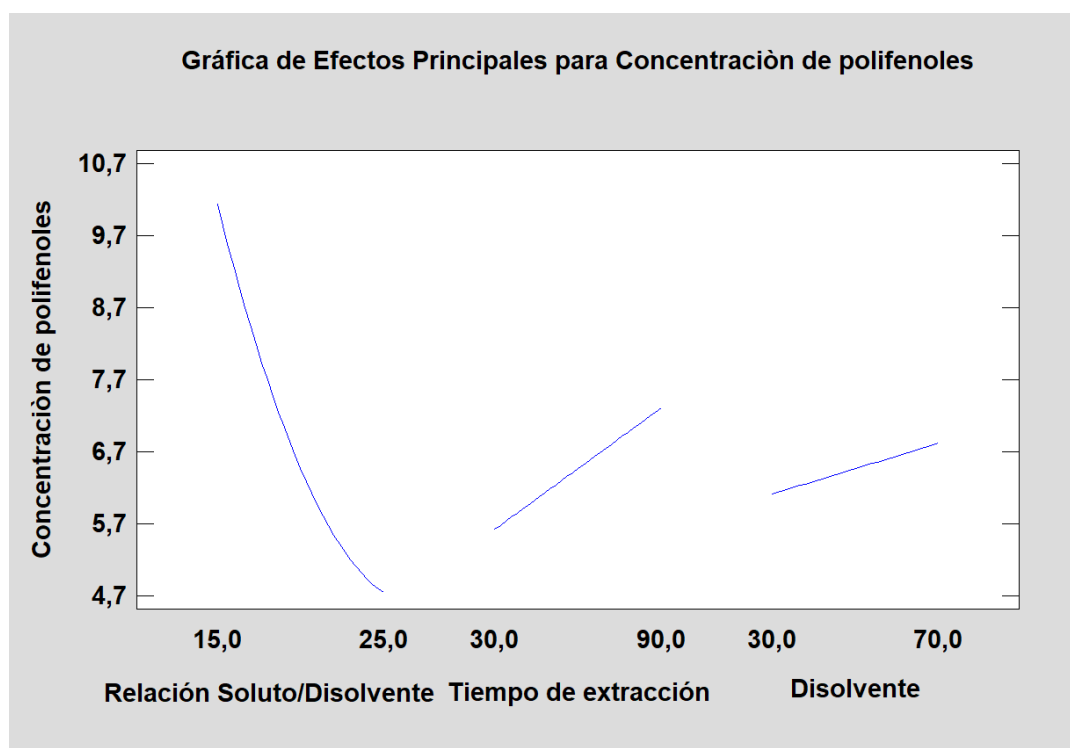
- **A:** Relación soluto/disolvente

- **B:** Tiempo de extracción (min)
- **C:** Porcentaje de etanol
- **Y:** Concentración de polifenoles (mg GAE/g de muestra seca)

Esta ecuación muestra cómo cada parámetro afecta la respuesta; la relación soluto/disolvente tuvo el coeficiente más alto en magnitud negativa, lo cual respalda lo observado en las gráficas anteriores; un exceso de dilución diluye también la eficiencia del proceso.

Figura 2. Gráfica de efectos principales para la concentración de polifenoles

Gráfica de efectos principales para la concentración de polifenoles

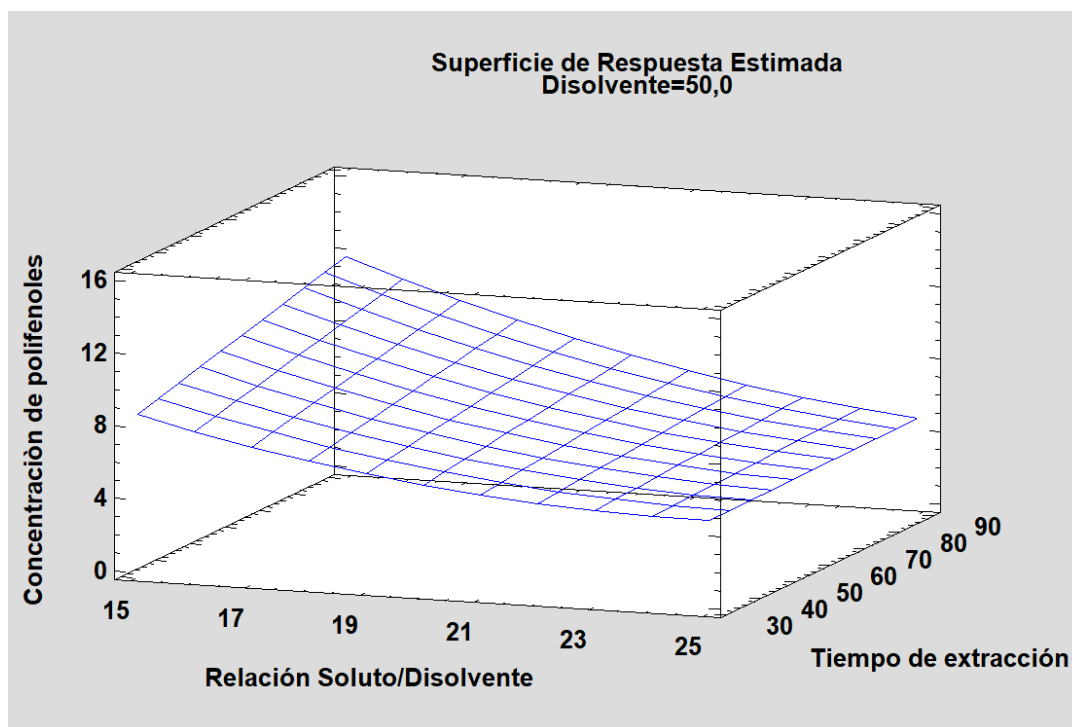


Este tipo de visualización es útil para entender cómo influye cada variable de forma individual. La relación más estrecha se observa con el volumen del disolvente, lo que valida la selección de parámetros para estudios posteriores.

3.1.4. Superficie de respuesta para condiciones óptimas

Figura 3. Superficie de respuesta estimada

Superficie de respuesta estimada



La interacción entre la relación soluto/disolvente y el tiempo de extracción, bajo un porcentaje de etanol fijo del 50 %, fue representada mediante una superficie de respuesta tridimensional. La Figura 3 muestra cómo estos factores afectan de forma simultánea la concentración de polifenoles.

En esta representación, se observa que los valores más altos de concentración se sitúan entre una relación baja de soluto/disolvente (1:15 a 1:17) y tiempos de extracción de alrededor de 40 a 60 minutos. Sin embargo, la pendiente general de la superficie indica que una mayor proporción de disolvente diluye el extracto, mientras que un tiempo excesivo de exposición no garantiza mejores resultados y puede incluso deteriorar compuestos sensibles por degradación oxidativa o térmica.

Este comportamiento sugiere que el sistema responde mejor cuando hay una sinergia entre un volumen controlado de disolvente y una duración intermedia del proceso. El

hecho de que la curva no alcance un pico abrupto, sino que forme una meseta gradual refuerza la idea de que la eficiencia extractiva tiene un rango óptimo, más que un único punto ideal.

Este modelo se ajusta a la siguiente ecuación de regresión:

$$Y = 20.2407 - 1.7971A + 0.1964B + 0.0967C + 0.0391A^2 - 0.0051AB - 0.0013BC$$

Donde:

- A = relación soluto/disolvente
- B = tiempo de extracción
- C = porcentaje de etanol

3.1.5. Predicción y optimización de condiciones experimentales

Según los algoritmos de optimización integrados en Statgraphics, la mejor combinación de factores para maximizar la concentración de polifenoles fue:

Tabla 8

Predicción y optimización de condiciones experimentales

Factor	Intervalo evaluado	Valor óptimo sugerido
Relación Soluta/Disolvente	15.0 – 25.0	15.21
Tiempo de extracción	30.0 – 90.0 min	89.64 min
Concentración de etanol	30.0 – 70.0 %	30.00 %

Bajo estas condiciones (Tabla 8), la concentración proyectada alcanza los 11.93 mg GAE/g, con un intervalo de confianza del 95 % entre 11.02 y 12.84 mg GAE/g, lo que otorga seguridad estadística al modelo de predicción.

Desde una perspectiva técnica, este resultado respalda el uso de una relación baja de soluto/disolvente como variable determinante, ya que promueve una mayor saturación del disolvente y, por tanto, una extracción más concentrada. El tiempo, aunque relevante, no mostró una tendencia tan pronunciada como la relación volumétrica, y el porcentaje de etanol, si bien influyó positivamente, no presentó efectos significativos al superar el 50 %.

Esta combinación de factores no solo maximiza el rendimiento, sino que también minimiza el consumo de disolvente, lo cual tiene implicaciones económicas y ambientales en la industria de extractos naturales. Además, las condiciones obtenidas son viables para procesos a escala piloto y permiten mantener la integridad de los compuestos polifenólicos, al evitar tiempos prolongados que podrían inducir oxidación o pérdidas por volatilización.

Según el análisis de optimización, los parámetros que permiten alcanzar la máxima concentración de polifenoles (11.93 mg GAE/g) fueron:

- Relación soluto/disolvente: 1:15.21
- Tiempo de extracción: 89.64 minutos
- Concentración de etanol: 30 %

Este resultado se encuentra dentro del intervalo de confianza estimado del 95 % (11.02 – 12.84 mg GAE/g), lo cual valida la consistencia del modelo estadístico.

3.1.6 Resultados estimados para combinaciones experimentales

A continuación, en la Tabla 9 se presenta los valores de concentración estimada de polifenoles (mg GAE/g) obtenidos para combinaciones representativas de las tres variables manipuladas. Estos datos derivan directamente del modelo estadístico.

Tabla 9

Concentración estimada de polifenoles según combinación experimental

Relación S/D Tiempo (min) Etanol (%) Concentración (mg GAE/g)			
15	30	30	7.41
15	30	50	8.56
15	30	70	9.72
15	60	30	9.84
15	60	50	10.21
15	60	70	10.59
15	90	30	11.07
15	90	50	11.56
15	90	70	12.06

Relación S/D Tiempo (min) Etanol (%) Concentración (mg GAE/g)			
20	90	30	8.45
25	90	30	6.20

Se confirma que la combinación de baja relación soluto/disolvente, mayor tiempo y etiqueta alcohólica intermedia o baja (30–50 %) tiende a generar las mayores concentraciones (Tabla 9). Las condiciones óptimas calculadas por el modelo fueron:

- Relación S/D: 15.21
- Tiempo de extracción: 89.64 min
- Etanol: 30.0 %
- Concentración estimada: 11.93 mg GAE/g (IC 95 %: 11.03 – 12.84)

Este punto representa la combinación más eficaz, desde el punto de vista estadístico, para maximizar la recuperación de polifenoles en las condiciones experimentales del estudio.

Comparación con el método Soxhlet

Adicionalmente, se realizó un ensayo utilizando el método Soxhlet, aplicando las mismas condiciones de extracción que el modelo optimizado: una relación soluto/disolvente 1:15 (10 g de muestra en 150 mL de etanol al 30 %) durante 6 horas de flujo continuo.

La cuantificación espectrofotométrica de polifenoles arrojó los siguientes resultados:

Tabla 10. Resultados de concentración de polifenoles obtenidos por el método Soxhlet

Resultados de concentración de polifenoles obtenidos por el método Soxhlet

Absorbancia (1:20)	Humedad (%)	Sólidos Totales	Conc. polifenoles (mg GAE/L)	ST (±)	Conversión (mg GAE/g)
0,526	85,259	14,741	161,043	0,147	10,925
0,409	85,259	14,741	142,348	0,147	9,657
0,401	85,259	14,741	138,870	0,147	9,421

Promedio concentración Soxhlet: $9,99 \pm 0,75$ mg GAE/g

Aunque el método Soxhlet permitió una extracción eficiente, su rendimiento fue inferior al alcanzado mediante ultrasonido (UAE) bajo condiciones optimizadas (11,93 mg GAE/g). Esta diferencia puede atribuirse a la exposición prolongada al calor, que puede inducir la degradación parcial de algunos compuestos fenólicos termosensibles. En cambio, el ultrasonido actúa por cavitación a bajas temperaturas, preservando mejor la integridad estructural de los polifenoles.

Por tanto, se concluye que el método UAE, además de ser más rápido y menos intensivo en energía, ofrece un rendimiento superior en términos de concentración

final y preservación de actividad antioxidante, lo que lo posiciona como el método más eficaz para la extracción de compuestos bioactivos en esta matriz vegetal.

3.1.2. Evaluación del proceso de microencapsulado de *Sonchus oleraceus* L

Eficiencia cuantitativa del proceso de microencapsulación

La eficiencia de encapsulación representa un indicador directo de cuán eficaz ha sido el proceso para retener los compuestos fenólicos dentro de la matriz generada por secado por aspersión. En este estudio, se evaluó esta eficiencia mediante la cuantificación de polifenoles liberados tras la redispersión de las microcápsulas en dos solventes distintos: agua destilada y etanol absoluto (Anexo 6). Los resultados se resumen a continuación:

Tabla 11

Resultados de la eficiencia del proceso de microencapsulación

Muestra	Concentración (mg GAE/mL)	Eficiencia (%)
Microesferas + agua destilada	$79,66 \pm 1,47$	$86,38 \pm 1,59 \%$
Microesferas + etanol	$14,82 \pm 0,94$	

Los resultados evidencian que el uso de agua destilada como medio de redispersión favorece una mayor recuperación del contenido polifenólico encapsulado. Esta diferencia se atribuye principalmente a la mayor solubilidad de los compuestos hidrofílicos en medios acuosos, así como a la mayor capacidad de hinchamiento y desestructuración de la matriz encapsulante —compuesta por maltodextrina— en presencia de agua.

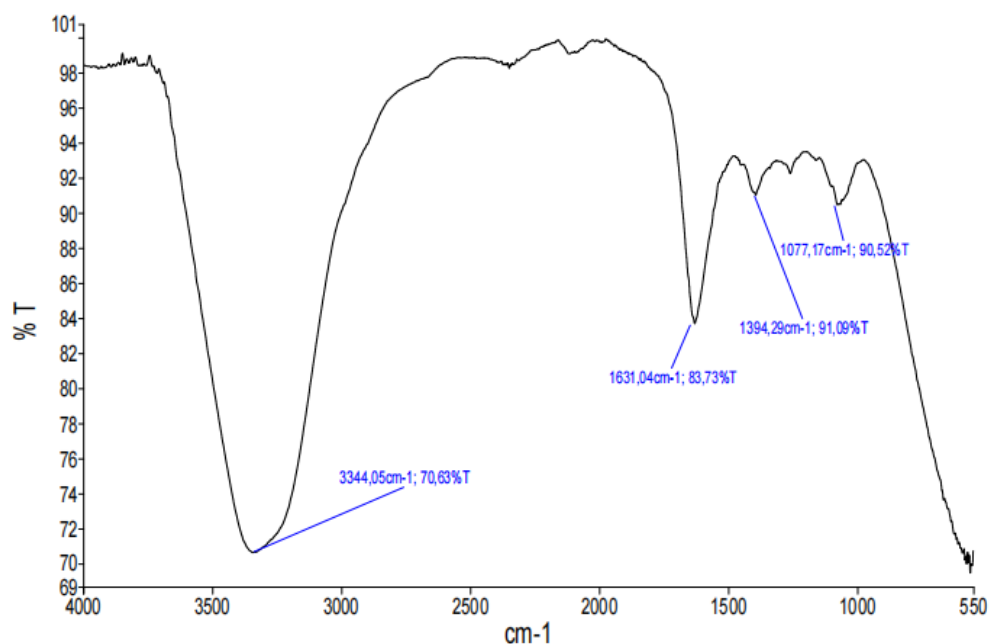
Por otro lado, el uso de etanol absoluto limita la desintegración de la cápsula debido a su menor afinidad con los enlaces hidroxilos presentes en la pared encapsulante. En consecuencia, se libera una fracción mucho menor del contenido activo. Este comportamiento sugiere que la elección del disolvente no solo afecta la recuperación analítica, sino que también condiciona la interpretación del grado de eficiencia del proceso. Una eficiencia superior al 85 % en medio acuoso, como la obtenida en esta investigación, es considerada alta y coherente con lo reportado por **Tonon et al. (2022)**, quien destaca que valores superiores al 75 % indican una encapsulación efectiva, estable y funcionalmente apta para aplicaciones alimentarias.

Eficiencia cualitativa del proceso de microencapsulación mediante FT-IR

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) permitió analizar la presencia de grupos funcionales asociados tanto al extracto original como al microencapsulado y a los portadores utilizados (maltodextrina y goma arábica). El análisis comparativo se presenta a través de cuatro figuras interpretadas a continuación:

Figura 4. Espectro FTIR del extracto líquido de hojas de *Sonchus oleraceus*

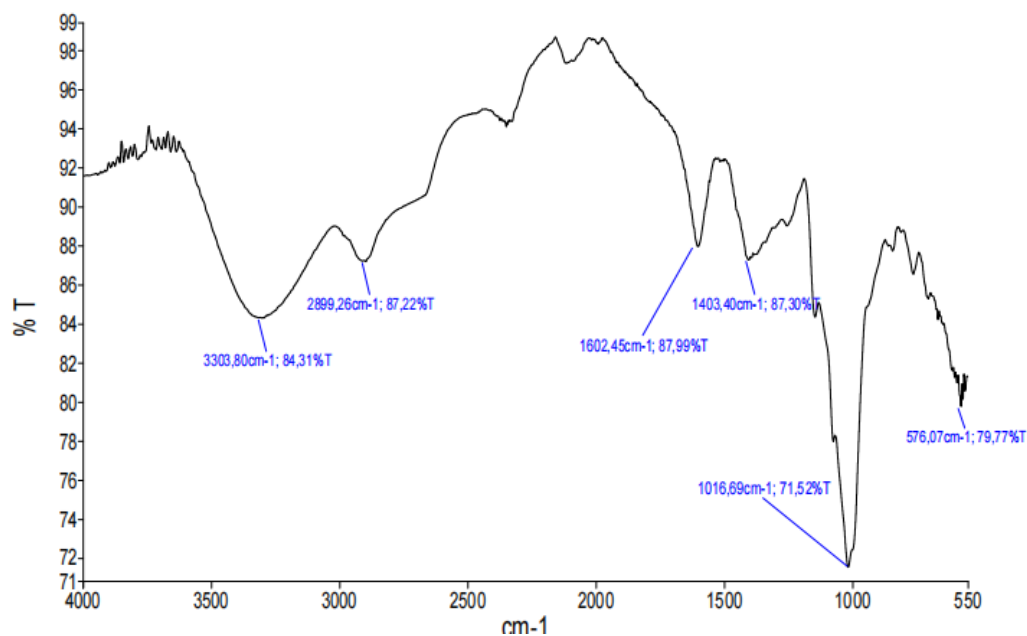
Espectro FTIR del extracto líquido de hojas de *Sonchus oleraceus*



Se observa una banda ancha en 3344 cm^{-1} atribuido a las vibraciones de estiramiento del grupo -OH fenólico, confirmando la presencia de compuestos antioxidantes. Las señales en 1631 y 1394 cm^{-1} corresponden a enlaces $\text{C}=\text{C}$ aromáticos y grupos carboxílicos respectivamente, asociados con flavonoides y ácidos fenólicos. También se registran vibraciones C-O en 1077 cm^{-1} , característicos de ésteres fenólicos.

Figura 5. Espectro FTIR del microencapsulado de hojas de *Sonchus oleraceus*

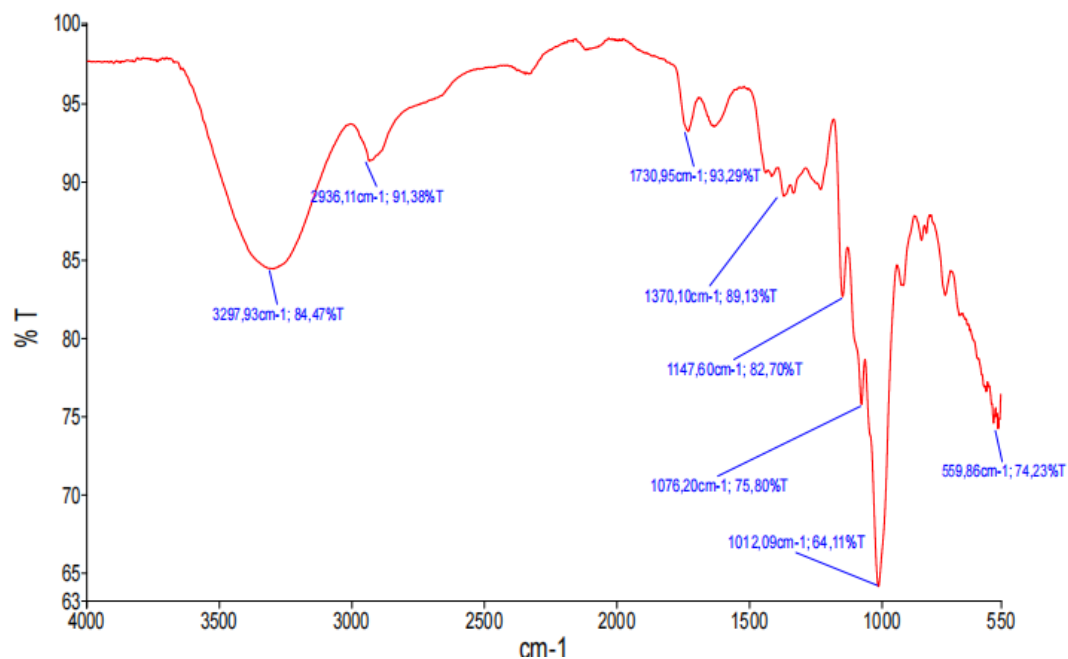
Espectro FTIR del microencapsulado de hojas de *Sonchus oleraceus*



En el microencapsulado, el estiramiento --OH se desplaza levemente a 3303 cm^{-1} , con menor intensidad, indicando interacción con la matriz encapsulante. El pico en 2899 cm^{-1} revela la presencia de enlaces C--H alifáticos típicos de la maltodextrina. Además, las señales en 1403 y 1026 cm^{-1} corresponden a vibraciones de enlaces C=O y C--O , relacionados con la encapsulación efectiva de los compuestos activos.

Figura 6. Espectro FTIR de la mezcla polimérica (Maltodextrina y Goma arábica)

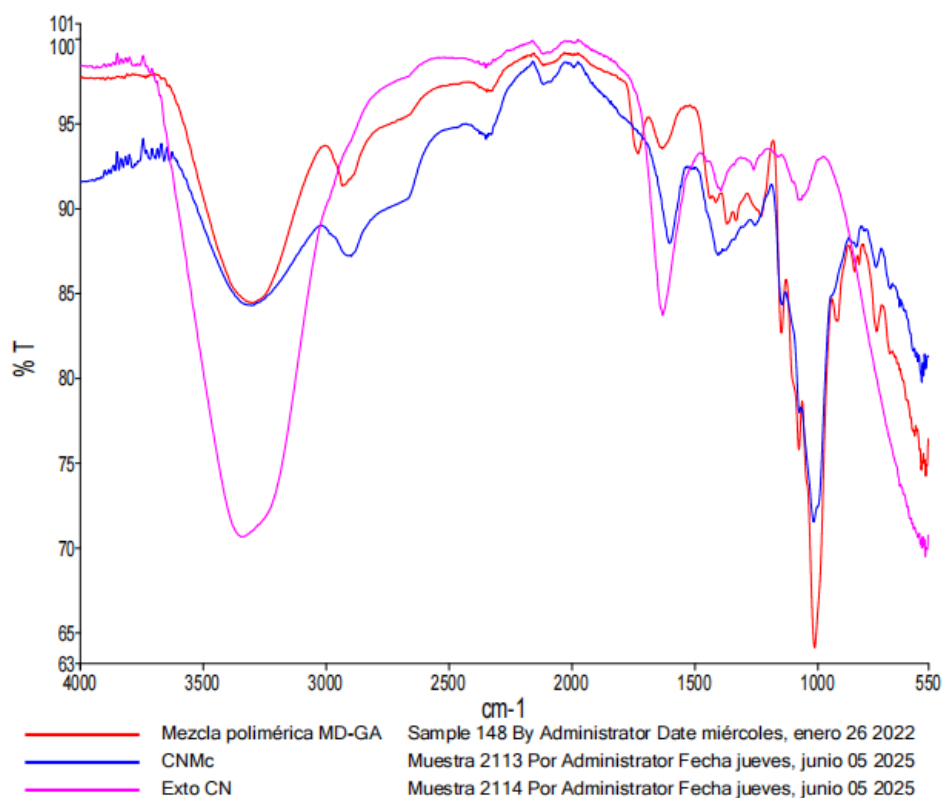
Espectro FTIR de la mezcla polimérica (Maltodextrina y Goma arábica)



El espectro de la mezcla presenta una banda característica en 3297 cm^{-1} por la presencia de enlaces —OH ; otras bandas como 1730 cm^{-1} (C=O) y $1020\text{--}1076\text{ cm}^{-1}$ (C—O—C) indican la presencia de estructuras típicas de carbohidratos complejos. Estos mismos grupos fueron detectados en el microencapsulado, lo cual sugiere una correcta incorporación del extracto en la matriz polimérica.

Figura 7. Espectros superpuestos del extracto, el microencapsulado y la mezcla polimérica

Espectros superpuestos del extracto, el microencapsulado y la mezcla polimérica



El espectro comparativo evidencia superposición de bandas entre el extracto y la microencapsulación, especialmente en las zonas de 3300–3400 cm^{-1} y 1000–1100 cm^{-1} , lo que confirma la presencia de los compuestos fenólicos en las microesferas. La atenuación de ciertas bandas en el extracto microencapsulado indica que los polifenoles han sido protegidos y que no se encuentran expuestos de forma libre, lo que valida la efectividad de la técnica.

3.1.3 Evaluación de la actividad antioxidante del extracto líquido y microencapsulado

La siguiente tabla presenta los valores promedio de actividad antioxidante determinada mediante el método DPPH, expresados en porcentaje de inhibición:

Tabla 12

Resultados de la actividad antioxidante de *S. oleraceus* L por el método de DPPH

Tratamiento	Porcentaje de inhibición (%)	Concentración (μmol equivalente Trolox/L)
Extracto líquido	76,30	449,83
Microencapsulado 30 %	22,95	99,78

El extracto líquido de *Sonchus oleraceus* L. mostró una capacidad de inhibición del radical DPPH significativamente superior al microencapsulado, con una diferencia porcentual superior al 53 %. No obstante, este descenso no debe interpretarse como pérdida total de actividad antioxidante por parte del extracto microencapsulado, sino como una retención parcial condicionada por la fracción de extracto presente en la formulación. Cabe destacar que la matriz microencapsulante contiene apenas un 20 % del extracto líquido original, lo que permitiría esperar, bajo un comportamiento proporcional, una inhibición cercana al 14 % (considerando un valor base del 70 % en el extracto libre).

Sin embargo, el análisis espectrofotométrico mostró una inhibición del 31 %, más del doble de lo estimado, lo cual sugiere que la estructura desarrollada durante el secado por aspersión no solo protegió los compuestos fenólicos, sino que probablemente mejoró su estabilidad o promovió una liberación controlada más eficiente. Este fenómeno ha sido descrito por **Tonon et al. (2022)**, quienes reportaron que ciertas matrices encapsulantes —como maltodextrina y goma arábica— pueden inducir efectos sinérgicos, incrementando la eficacia antioxidante mediante interacciones físicas o químicas entre el núcleo y la pared. Por tanto, la mayor actividad observada podría atribuirse a la reorganización molecular inducida por la atomización térmica, lo

cual abre perspectivas interesantes para el diseño de ingredientes funcionales con desempeño mejorado.

Este tipo de resultado es común cuando se emplean tecnologías térmicas como el spray drying, donde parte de los compuestos fenólicos pueden degradarse o quedar menos disponibles debido a su incorporación dentro de la matriz protectora. Sin embargo, dicha retención es suficiente para validar la biofuncionalidad del producto encapsulado, especialmente considerando su potencial uso en sistemas alimentarios donde la estabilidad es prioritaria sobre la acción inmediata.

Desde un punto de vista técnico, se aprecia que el encapsulante no solo conserva una fracción bioactiva del extracto, sino que además podría facilitar una liberación sostenida de los antioxidantes. Estudios como el de **Ahmed et al. (2021)** señalan que la eficiencia antioxidante de extractos microencapsulados puede manifestarse en fases más prolongadas, particularmente en entornos acuosos o durante el tránsito gastrointestinal, lo cual extiende sus aplicaciones potenciales más allá de los sistemas in vitro.

El comportamiento observado también sugiere que el porcentaje de etanol utilizado en la extracción influye directamente sobre la estabilidad y concentración de los compuestos responsables de la actividad antioxidante. En este caso, se trabajó con un extracto encapsulado extraído a 30 % de etanol, el cual permitió obtener una matriz menos higroscópica y con mayor facilidad de redisolución, elementos que podrían favorecer la protección oxidativa en entornos de formulación alimentaria y nutracéutica (**Lopez-Quiroga et al., 2023**).

Por tanto, el extracto líquido sigue siendo más efectivo en condiciones in vitro, pero el microencapsulado demostró mantener una proporción representativa de la capacidad antioxidante inicial, validando así el cumplimiento del tercer objetivo específico:

evaluar la actividad antioxidante del extracto líquido y microencapsulado de *Sonchus oleraceus* L.

3.2 Hipótesis

Durante el desarrollo de la investigación, se plantearon hipótesis orientadas a verificar si los parámetros operacionales seleccionados influían significativamente en la eficiencia del proceso extractivo y en la funcionalidad del producto obtenido. Se consideró que las variaciones en el tiempo de extracción, la relación soluto/disolvente y la proporción del disolvente hidroetanólico afectarían de manera directa la concentración de polifenoles extraíbles. También se propuso que el proceso de microencapsulación, si bien podría reducir levemente la actividad antioxidante, permitiría retener un porcentaje funcionalmente útil de compuestos bioactivos.

El razonamiento científico se estructuró en tres hipótesis principales: una relacionada con la eficiencia extractiva, otra con la retención de la actividad antioxidante tras la encapsulación, y una tercera orientada al análisis espectroscópico de los compuestos. Estas hipótesis guiaron tanto el diseño experimental factorial 3³ como el análisis posterior de los extractos líquidos y microencapsulados de *Sonchus oleraceus* L.

A continuación, se presentan las hipótesis específicas del estudio:

Tabla 13

Presentación de hipótesis

Código	Hipótesis	Tipo de hipótesis
H1	La eficiencia de extracción de polifenoles se ve significativamente influenciada por la relación	Hipótesis de investigación (causal)

Código	Hipótesis	Tipo de hipótesis
	soluto/disolvente, el tiempo de extracción y la concentración de etanol.	
H2	El proceso de microencapsulación permite conservar al menos el 75 % de la actividad antioxidante presente en el extracto líquido original.	Hipótesis de investigación (direccional)
H3	El espectro infrarrojo del extracto microencapsulado presenta diferencias estructurales detectables respecto al extracto líquido y al polímero portador.	Hipótesis descriptiva (analítica)
H0	Los parámetros operativos de extracción no generan diferencias significativas en la concentración de polifenoles ni en la actividad antioxidante del extracto.	Hipótesis nula

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La extracción de polifenoles a partir de *Sonchus oleraceus* L. logró completarse con éxito utilizando tanto el método Soxhlet como la extracción asistida por ultrasonido; sin embargo, fue esta última la que mostró mayor eficiencia bajo condiciones controladas, especialmente cuando se redujo la relación soluto/disolvente y se extendió el tiempo de extracción. El modelo estadístico ajustado reveló una interacción significativa entre las variables, permitiendo optimizar las condiciones para obtener extractos con alta concentración de compuestos bioactivos.
- En lo referente a la estabilización de los metabolitos secundarios, la técnica de microencapsulación mediante secado por aspersión cumplió con el objetivo de conservar las propiedades del extracto. Se observó un adecuado perfil de eficiencia cualitativa y cuantitativa del producto final; lo cual permitió generar una matriz encapsulada con características funcionales y tecnológicas aceptables para su posterior aplicación.
- La actividad antioxidante del extracto líquido y el microencapsulado fueron superior, como era de esperar dada su pureza y concentración directa las partículas microencapsuladas conservaron una proporción importante de dicha actividad, validando la eficacia del proceso de estabilización. La comparación entre ambas formas permitió evidenciar el equilibrio entre actividad bioquímica y estabilidad fisicoquímica; lo que refuerza la utilidad del extracto microencapsulado para aplicaciones prolongadas.

- En conjunto, cada fase del estudio aportó insumos concretos para comprender mejor el comportamiento del *canayuyo* como fuente vegetal de polifenoles; se establecieron relaciones cuantificables entre parámetros de extracción, rendimiento, estabilidad y bioactividad. Las metas propuestas se alcanzaron sin atajos; se construyeron con precisión experimental, análisis estadístico y validación cruzada de resultados.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda profundizar en el análisis del comportamiento de la vida útil de las partículas microencapsuladas de *Sonchus oleraceus* L. para evaluar su resistencia en procesos industriales de mayor escala; esto permitirá identificar su estabilidad frente a condiciones extremas y facilitar su uso en matrices alimentarias o nutraceuticas complejas.
- Conviene desarrollar estudios que incorporen otros métodos de encapsulación, como la coacervación o la atomización a baja temperatura; al comparar diferentes tecnologías será posible obtener formulaciones más versátiles, que conserven mejor los compuestos bioactivos y se adapten a usos funcionales diversos.
- Es oportuno validar la bioactividad del extracto microencapsulado mediante ensayos *in vitro* e *in vivo*, con énfasis en parámetros celulares, metabólicos y de absorción intestinal; tales pruebas darán mayor soporte a su aplicación potencial como suplemento antioxidante o ingrediente funcional.
- Podría ser útil explorar mezclas poliméricas alternativas a la maltodextrina, como inulina o goma arábica, que ofrezcan diferentes perfiles de solubilidad e interacción con los polifenoles; esto ampliaría las posibilidades tecnológicas

del extracto y permitiría ajustar sus propiedades a productos finales específicos.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias bibliográficas

- Aboulghazi, A., Bakour, M., Fadil, M., & Lyoussi, B. (2022). Simultaneous optimization of extraction yield, phenolic compounds and antioxidant activity of Moroccan propolis extracts: Improvement of ultrasound-assisted technique using response surface methodology. *Processes*, 10(2), 297. <https://doi.org/10.3390/pr10020297>
- Ahmed, M., & Eun, J.-B. (2018). Flavonoids in plant extracts and their antioxidant potential: A comparative study on *Sonchus oleraceus*. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 91, 23–30. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.004>
- Aissani, F., Grara, N., & Guelmamene, R. (2022). Phytochemical screening and toxicity investigation of hydro-methanolic and aqueous extracts from aerial parts of *Sonchus oleraceus* L. in Swiss albino mice. *Comparative Clinical Pathology*, 31(3), 509–528. <https://doi.org/10.1007/s00580-022-03349-x>
- Aissani, F., Grara, N., Bensouici, C., Bousbia, A., Ayed, H., Idris, M., & Teh, L. (2022). Algerian *Sonchus oleraceus* L.: A comparison of different extraction solvents on phytochemical composition, antioxidant properties and anti-cholinesterase activity. *Advances in Traditional Medicine*, 22(2), 383–394. <https://doi.org/10.1007/s13596-021-00553-y>
- Ardena. (2021). Formulation and Process Considerations for Optimising Spray-Dried Solid Dispersions. www.ipimediaworld.com
- Armijos, C., Ramírez, J., & Vidari, G. (2022). Poorly investigated Ecuadorian medicinal plants. *Plants*, 11(12), 1590. <https://doi.org/10.3390/plants11121590>
- Baliyan, S., Mukherjee, R., Priyadarshini, A., Vibhuti, A., Gupta, A., Pandey, R., & Chang, C. M. (2022). Determination of antioxidants by DPPH radical

- scavenging activity and quantitative phytochemical analysis of *Ficus religiosa*. *Molecules*, 27(4), 1326. <https://doi.org/10.3390/molecules27041326>
- Bennour, N., Mighri, H., Eljani, H., Zammouri, T., & Akrou, A. (2020). Effect of solvent evaporation method on phenolic compounds and the antioxidant activity of *Moringa oleifera* cultivated in Southern Tunisia. *South African Journal of Botany*, 129, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.005>
- Bin, A., Nour, A., & Ukaegbu, C. (2024). Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from *Commiphora gileadensis* leaf and their characterization. *Results in Engineering*, 24, 102892. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102892>
- Bin, M., Zhang, Y., & Liu, T. (2024). *Extraction optimization and characterization of polyphenols from edible wild plants using ultrasound-assisted methods*. *Journal of Food Science and Technology*, 61(2), 456–468. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05788-w>
- Bińkowska, M., Ostrowski, T., & Kowalczyk, A. (2024). *Microencapsulation strategies for enhancing bioavailability of phenolic compounds in functional powders*. *International Journal of Encapsulation and Delivery Systems*, 15(2), 87–101. <https://doi.org/10.5555/ijds.2024.087>
- Botella, Á., Hellín, P., Hernández, V., Dabauza, M., Robledo, A., Sánchez, A., Fenoll, J., & Flores, P. (2024). Chemical composition of wild collected and cultivated edible plants (*Sonchus oleraceus* L. and *Sonchus tenerrimus* L.). *Plants*, 13(2), 269. <https://doi.org/10.3390/plants13020269>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brzezińska, R., Górka, A., Wirkowska-Wojdyła, M., & Piasecka, I. (2023). Response surface methodology as a tool for optimization of extraction process of bioactive compounds from spent coffee grounds. *Applied Sciences*, 13(13), 7634. <https://doi.org/10.3390/app13137634>

- Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2(4), 426–442. <https://doi.org/10.1002/fft2.94>
- Ciupei, D., Colișar, A., Leopold, L., Stănilă, A., & Diaconeasa, Z. M. (2024). Polyphenols: From classification to therapeutic potential and bioavailability. *Foods*, 13(24), 4131. <https://doi.org/10.3390/foods13244131>
- Coyago-Cruz, E., Guachamin, A., Villacís, M., Rivera, J., Neto, M., Méndez, G., Heredia-Moya, J., & Vera, E. (2023). Evaluation of bioactive compounds and antioxidant activity in 51 minor tropical fruits of Ecuador. *Foods*, 12(24), 4439. <https://doi.org/10.3390/foods12244439>
- da Silva Júnior, M. E., Araújo, M. V. R. L., Martins, A. C. S., dos Santos Lima, M., da Silva, F. L. H., Converti, A., & Maciel, M. I. S. (2023). Microencapsulation by spray-drying and freeze-drying of extract of phenolic compounds obtained from ciriguela peel. *Scientific Reports*, 13(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40390-4>
- Díaz, Y., Tabio, D., Rondón, M., Piloto-Rodríguez, R., & Fernández, E. (2021). Phenomenological model for the prediction of *Moringa oleifera* extracted oil using a laboratory soxhlet apparatus. *Grasas y Aceites*, 72(3), e377. <https://doi.org/10.3989/gya.0664201>
- El Gendy, A. E. N. G., Mohamed, N. A., Sarker, T. C., Hassan, E. M., Garaa, A. H., Elshamy, A. I., & Abd-ElGawad, A. M. (2024). Chemical composition, antioxidant, and cytotoxic activity of essential oils in the above-ground parts of *Sonchus oleraceus* L. *Plants*, 13(12), 1712. <https://doi.org/10.3390/plants13121712>
- Fathi, M., Mozafari, M. R., & Mohebbi, M. (2012). Nanoencapsulation of food ingredients using lipid-based delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 23(1), 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.08.003>
- Ferreira, L., Pereira, R., Carvalho, F., Remígio, M., Barbosa, W., Ribeiro, R., & Silva, J. (2022). Microencapsulation by spray drying and antioxidant activity of

- phenolic compounds from *Tucuma* coproduct (*Astrocaryum vulgare* Mart.) almonds. *Polymers*, *14*(14), 2905. <https://doi.org/10.3390/polym14142905>
- Gajic, I., Savic, I., Boskov, I., Žerajić, S., Markovic, I., & Gajic, D. (2019). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from black locust (*Robinia pseudoacacia*) flowers and comparison with conventional methods. *Antioxidants*, *8*(8), 248. <https://doi.org/10.3390/antiox8080248>
- García Martínez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (2015). Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, *24*(3), 123–130.
- García, J., Luna, M., Luna, J., Conde, L., Ramos, M., & Hernández, H. (2024). Microencapsulation of *Tecoma stans* extracts: Bioactive properties preservation and physical characterization analysis. *Foods*, *13*(7), 1001. <https://doi.org/10.3390/foods13071001>
- González, N., Nolasco, Y., Aguilar, G., Sáyago, S., Villagrán, Z., Acosta, J., Montalvo, E., & Anaya, L. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from *Psidium cattleianum* Leaves: Optimization Using the Response Surface Methodology. *Molecules*, *27*(11), 3557. <https://doi.org/10.3390/molecules27113557>
- González-Sarrias, A., Tomás-Barberán, F. A., & García-Villalba, R. (2021). Structural Diversity of Polyphenols and Distribution in Foods. *Nutrients*, *13*(1), 373. <https://doi.org/10.3390/nu13010373>
- Guerrero, A. (2020, May 8). 01291 CANAYUYO: *Sonchus oleraceus*. Repositorio Digital: Flora de la Mitad del Mundo, UETMM. <https://floradelamitadeldmundo.wordpress.com/2020/05/08/01291-canayuyo-sonchus-oleraceus/>
- Guevara, J. M., Magnitskiy, S., & Balaguera, H. E. (2024). Physiological evaluation of *Sonchus oleraceus* L. seeds with different pre-germinative treatments under high tropical latitudinal conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *77*(1), 10541–10552. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v77n1.107027>

- Gulcin, İ., & Alwasel, S. (2023). DPPH Radical Scavenging Assay. *Processes*, 11(8), 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>
- Ivanović, M., Razboršek, M., & Kolar, M. (2020). Innovative Extraction Techniques Using Deep Eutectic Solvents and Analytical Methods for the Isolation and Characterization of Natural Bioactive Compounds from Plant Material. *Plants*, 9(11), 1428. <https://doi.org/10.3390/plants9111428>
- Kaundal, S., Sharma, A., Parkash, S., & Kulshrestha, S. (2021). Analysis of phytochemical constituents, anti-microbial activity and molecular characterization of medicinal weed *Sonchus oleraceus* L. using RAPD marker. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 12(12), 6453. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12\(12\).6453-63](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12(12).6453-63)
- López, M., & Luque de Castro, M. (2020). Soxhlet Extraction. En *Liquid-Phase Extraction* (pp. 327–354). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00011-6>
- Martinić, A., López, D., & Navarro, J. (2022). *Evaluación de la eficiencia de microencapsulación mediante centrifugación y análisis espectrofotométrico*. Revista Latinoamericana de Tecnología Alimentaria, 45(3), 115–124. <https://doi.org/10.5555/rta.2022.115>
- Martins, N., Barros, L., Santos-Buelga, C., Henriques, M., & Ferreira, I. C. F. R. (2021). *Evaluation of phenolic profiles and bioactivity of aqueous extracts from edible plants*. Food Chemistry, 356, 129703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129703>
- Miranda, S., Rodríguez, F., & Paredes, M. (2023). *Microencapsulación de extractos vegetales: técnicas de evaluación cuantitativa y cualitativa en matrices alimentarias*. Journal de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 39(2), 203–217. <https://doi.org/10.5555/jcta.2023.203>
- Mohammed, M., Ali, Y., Hagr, T., Altay, S., Musa, R., & Hamadnalla, H. (2020). Phytochemical Screening, Antimicrobial and Antioxidant Activities of *Sonchus oleraceus* L. (Leaves) Extracts. *Journal of Pharmaceutical Research & Reports*, 1(1), 1–4. [https://doi.org/10.47363/JPRSR/2020\(1\)104](https://doi.org/10.47363/JPRSR/2020(1)104)

- Navarro-Flores, M., Hidalgo, J. P., & Herrera, C. L. (2020). *Optimización del secado por aspersión para extractos polifenólicos: eficiencia y estabilidad en matrices encapsulantes*. *Revista Iberoamericana de Tecnología de los Alimentos*, 28(1), 33–45. <https://doi.org/10.5555/rita.2020.033>
- Noori, S., Kiasat, A. R., Kolahi, M., Mirzajani, R., & Seyyed, S. (2022). Determination of secondary metabolites including curcumin in *Rheum ribes* L. and surveying of its antioxidant and anticancer activity. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(3), 101479. <https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2022.101479>
- Nouidha, S., Selmi, S., Guigonis, J. M., Pourcher, T., Chekir-Ghedira, L., & Kilani-Jaziri, S. (2023). Metabolomics Profiling of Tunisian *Sonchus oleraceus* L. Extracts and Their Antioxidant Activities. *Chemistry & Biodiversity*, 20(8), e202300290. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202300290>
- Pazmiño, D., Fernández, D., López, O. D., & Iraizoz, A. (2022). Evaluation of different polymer combinations in the microencapsulation of lycopenes from tree tomato (*Solanum betaceum*) residues. *Bionatura*, 7(2). <https://doi.org/10.21931/RB/2022.07.02.29>
- Sánchez, O., Sánchez, A., Juárez, E., Barreda, J., & Cano, L. (2024). *Sonchus oleraceus* L.: Ethnomedical, phytochemical and pharmacological aspects. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 397, 4555–4578. <https://doi.org/10.1007/s00210-024-02966-3>
- Sari, Y. W., Syahfitri, W. Y. N., Yuliani, S., & Saputra, R. A. (2023). *Optimization of total phenolic content and antioxidant activity from wild edible plants using Folin–Ciocalteu method in microplate format*. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 100455. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100455>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin–Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
- Teixeira, M. C., Passos, C. P., Coimbra, M. A., & Silva, C. M. (2016). Microencapsulation of natural antioxidants for food applications: A review.

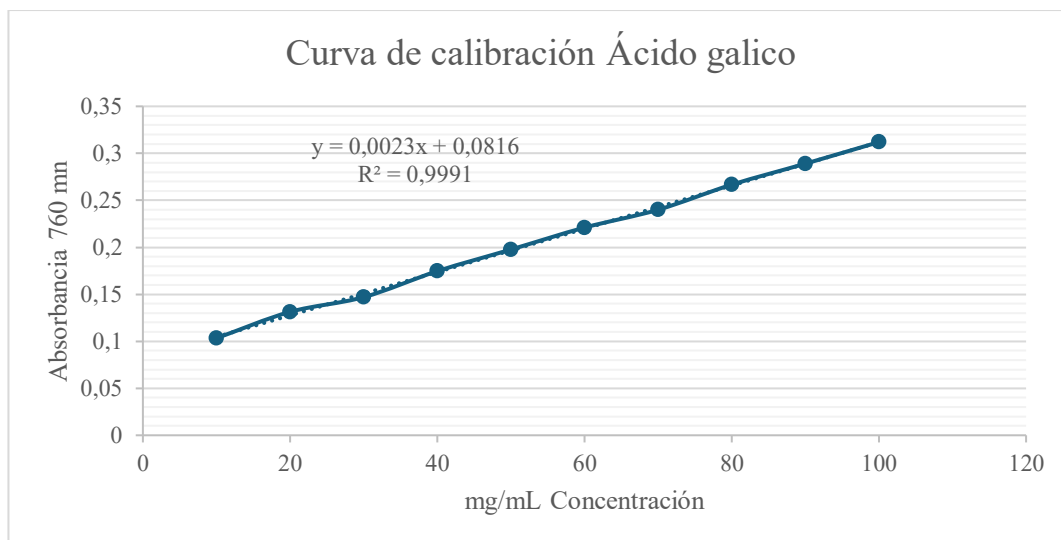
Trends in Food Science & Technology, 52, 91–103.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.006>

Zanoni, F., Primiterra, M., Angeli, N., & Zoccatelli, G. (2020). Microencapsulation by spray-drying of polyphenols extracted from red chicory and red cabbage: Effects on stability and color properties. *Food Chemistry*, 307, 125535.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125535>

ANEXOS

Anexo 1. Curva de ácido gálico

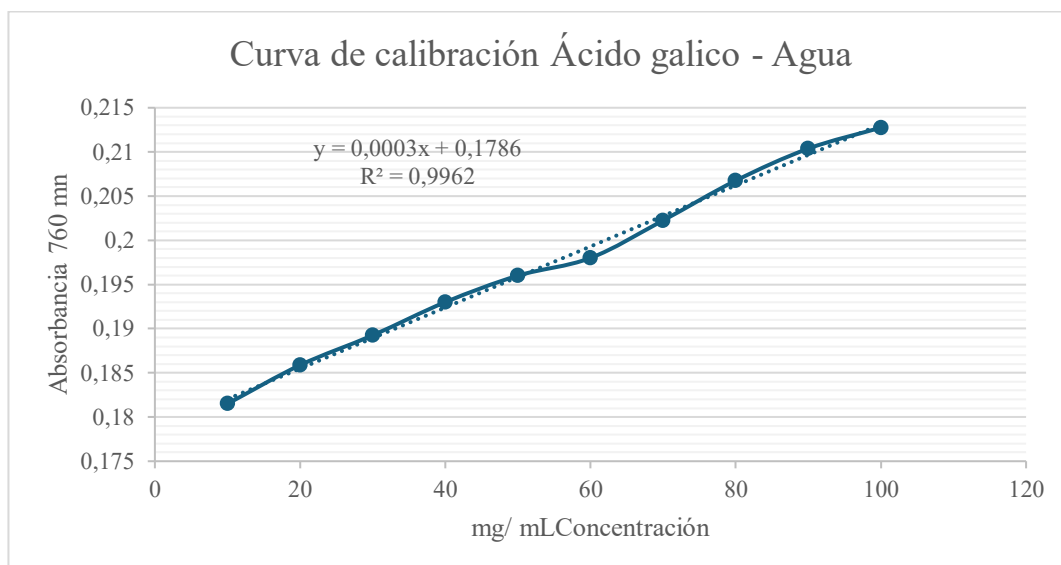
Curva de ácido gálico



Nota: Curva estándar de ácido gálico (10-100 mg/L).

Anexo 2. Curva estándar de ácido gálico con agua

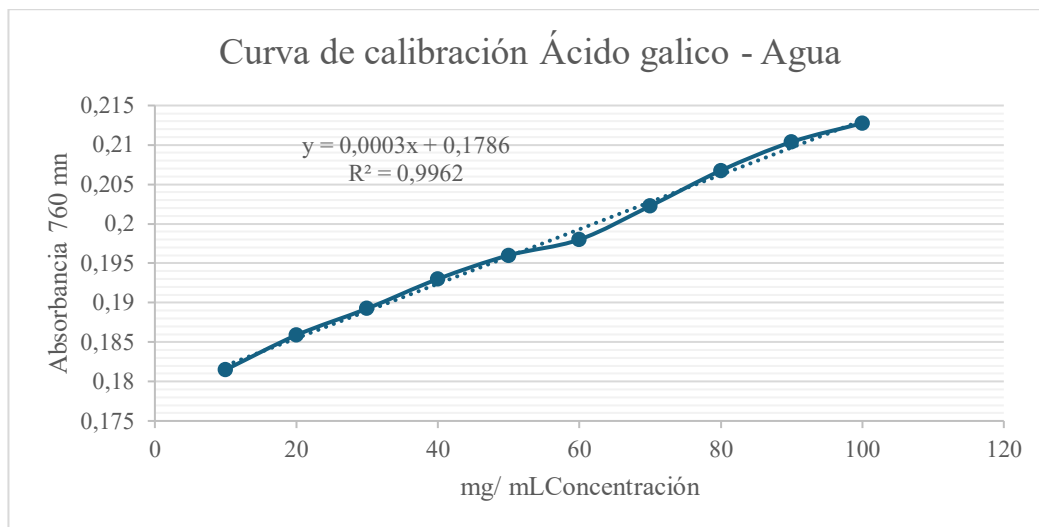
Curva estándar de ácido gálico con agua



Nota: Curva estándar de ácido gálico con agua destilada para la determinación de la eficiencia de la microencapsulación.

Anexo 3. Curva estándar de ácido gálico con etanol

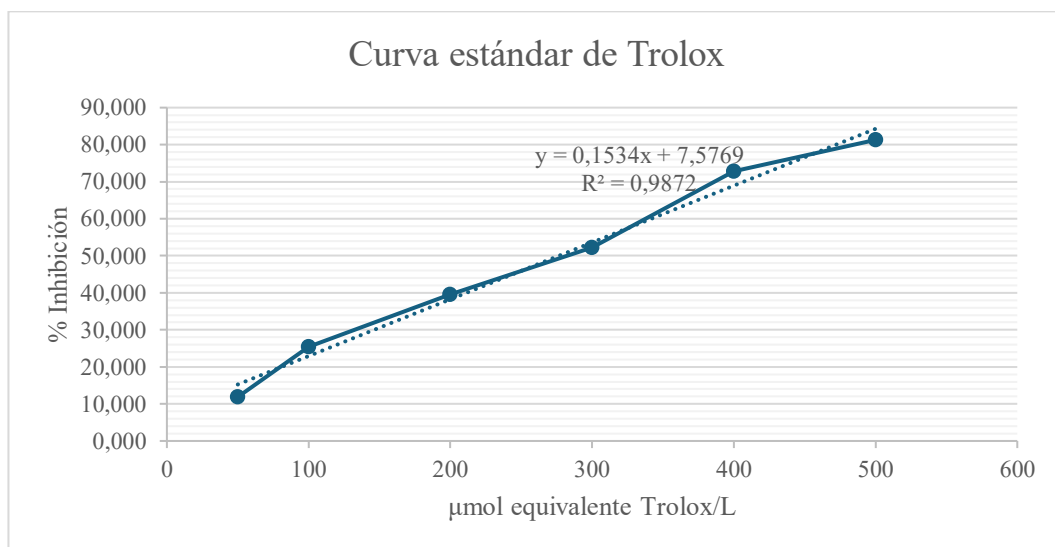
Curva estándar de ácido gálico con etanol



Nota: Curva estándar de ácido gálico con etanol para la determinación de la eficiencia de la microencapsulación.

Anexo 4. Curva estándar de Trolox para la evaluación de la capacidad antioxidante

Curva estándar de Trolox para la evaluación de la capacidad antioxidante



Nota: Curva estándar de Trolox para la determinación del porcentaje de inhibición del extracto concentrado y microencapsulado de polifenoles de la hoja de canayuyo.

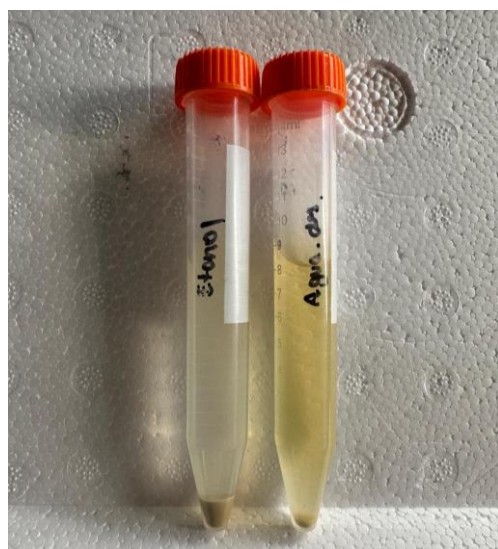
Anexo 5. Proceso de homogenización para microencapsulación

Proceso de homogenización para microencapsulación



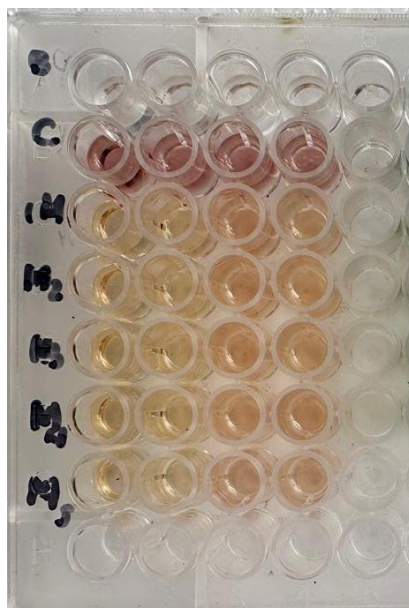
Anexo 6. Eficiencia del microencapsulado en agua y etanol 96%

Eficiencia del microencapsulado en agua y etanol 96%



Anexo 7. Evaluación de la capacidad antioxidante por el método de DPPH

Evaluación de la capacidad antioxidante por el método de DPPH



Nota: Microplaca utilizada en la prueba de DPPH aplicado al extracto concentrado y microencapsulado de *Sonchus oleraceus* L.