

VALORIZACIÓN DE LAS HOJAS DE AJO DE MONTE (*Mansoa alliacea*) COMO INGREDIENTE FUNCIONAL: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA, PERFIL DE PIGMENTOS Y POTENCIAL ANTIOXIDANTE

VALORIZATION OF GARLIC VINE (*Mansoa alliacea*) LEAVES AS A FUNCTIONAL INGREDIENT: PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, PIGMENT PROFILE, AND ANTIOXIDANT POTENTIAL

Luis Alberto Egas -Astudillo ¹

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Quevedo-Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4662-5538>

Gerson Argenis Hidalgo Mendoza ^{2*}

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, Quevedo-Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4784-5237>. Correo: gerson.hidalgo2016@uteq.edu.ec

Clara Elena Villacrés-Poveda ³

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Departamento de Nutrición y Calidad, Mejía-Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9660-5845>

Marivel A. Quelal -Vascones ⁴

⁴ Programa de Ingeniería en Agroindustria de Alimentos, Facultad de Ciencias Agrícolas y Agroindustriales, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay Tech, San Miguel de Urququí 100119, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4968-0636>

* Autor para correspondencia: gerson.hidalgo2016@uteq.edu.ec

Resumen

Mansoa alliacea es una especie de uso tradicional en Ecuador cuyo aprovechamiento agroindustrial, aún es limitado. El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad antioxidante y establecer su potencial como ingrediente funcional. Se realizó una caracterización fitoquímica de las hojas deshidratadas, luego se

compararon cuatro medios de extracción. Posteriormente, el extracto seleccionado se encapsuló empleando un secador por aspersión Büchi-mini B-290 y usando maltodextrina (3 %, 5 % y 7 %), goma xantana (0,25 %, 0,50 % y 0,75 %) y temperatura de entrada del equipo (120 °C, 150 °C y 180 °C) como factores. El tamizaje fitoquímico de las hojas mostró una abundante presencia de flavonoides y una presencia moderada de alcaloides y triterpenos. En los encapsulados (polvos), la humedad varió entre 0,132 y 1,3 %, la actividad de agua entre 0,152 y 0,356, los fenoles totales entre 0,486 y 1,271 mg de ácido gálico/g y la capacidad antioxidante entre 90,396 y 271,438 µM Trolox/g. La optimización multirrespuesta estimó como condición favorable 4,94 % de maltodextrina, 0,75 % de goma xantana y 180 °C, con una deseabilidad de 0,937. El proceso permitió obtener un polvo con elevada capacidad antioxidante y condiciones fisicoquímicas compatibles con su estudio como ingrediente funcional.

Palabras clave: *Mansoa alliacea*; antioxidantes; secado por aspersión; encapsulación; ingrediente funcional

Abstract

Mansoa alliacea is a species traditionally used in Ecuador, though its agro-industrial utilization remains limited. The study aimed to evaluate its antioxidant capacity and determine its potential as a functional ingredient. A phytochemical characterization of the dehydrated leaves was conducted, followed by a comparison of four extraction media. Subsequently, the selected extract was encapsulated using a Büchi Mini B-290 sp 3ray dryer, with maltodextrin (3, 5, and 7%), xanthan gum (0.25, 0.50, and 0.75%), and inlet temperature (120, 150, and 180°C) as factors. Phytochemical screening of the leaves revealed an abundance of flavonoids and moderate levels of alkaloids and triterpenes. In the encapsulated powders, moisture content ranged from 0.132 % to 1.3 %, water activity from 0.152 to 0.356, total phenols from 0.486 to 1.271 mg gallic acid/g, and antioxidant capacity from 90.396 to 271.438 µg Trolox/g. Multi-response optimization identified the favorable conditions as 4.94 % maltodextrin, 0.75 % xanthan gum, and an inlet temperature of 180 °C, with a desirability score of 0.937. The process yielded a powder with high antioxidant capacity and physicochemical properties suitable for its evaluation as a functional ingredient.

Keywords: *Mansoa alliacea*; antioxidants; spray drying; encapsulation; functional ingredient

Fecha de recibido: 08/06/2026

Fecha de aceptado: 24/09/2026

Fecha de publicado: 30/09/2026

Introducción

Mansoa alliacea, conocida en Ecuador como ajo de monte, es una planta de la familia Bignoniaceae utilizada tradicionalmente como condimento y en preparaciones medicinales. Sus hojas emiten un aroma semejante al ajo y contienen metabolitos que han sido relacionados con actividad antioxidante, entre ellos compuestos

fenólicos, flavonoides, taninos y compuestos sulfurados (Davila et al., 2010; Quiroga, 2021). Sin embargo, el conocimiento sobre su transformación en ingredientes alimentarios estables todavía es reducido.

La oxidación deteriora la calidad de los alimentos y limita la estabilidad de numerosos compuestos bioactivos. En este contexto, la recuperación de antioxidantes vegetales y su incorporación en matrices secas constituye una alternativa para diversificar ingredientes y disminuir la dependencia de aditivos sintéticos. El secado por aspersión permite convertir extractos líquidos en polvos mediante la atomización y evaporación rápida del solvente; además, el empleo de materiales encapsulantes puede favorecer la protección de los compuestos sensibles durante el proceso (Luna et al., 2017; Díaz et al., 2023).

La capacidad del proceso depende de la naturaleza del extracto, de la temperatura de entrada y de la formulación de la pared encapsulante Luna, J., López, M., Jiménez, O., & Luna, L. (2017). La maltodextrina aporta facilidad de secado y solubilidad, mientras que la goma xantana modifica la estructura y la retención de agua de la matriz Ríos, S., Gil, & Andrea. (2021). Por ello, la optimización simultánea de humedad, actividad de agua, contenido fenólico y capacidad antioxidante es necesaria para seleccionar una condición de proceso con interés tecnológico.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad antioxidante de un polvo obtenido a partir de hojas de *M. alliacea*, mediante la comparación de métodos de extracción, la selección del sistema encapsulante y la optimización de las condiciones de secado por aspersión. El estudio se orientó a determinar su potencial como ingrediente funcional, sin atribuirle efectos terapéuticos ni validar todavía su comercialización.

Materiales y métodos

Preparación de la muestra

Las hojas de *M. alliacea* fueron proporcionadas por la Estación Experimental Central de la Amazonía, cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana, Ecuador. En tanto que la caracterización y análisis se realizaron en el Laboratorio de Nutrición y Calidad Área de Investigación y Desarrollo de Procesos y productos en Alimentos 2 de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP, ubicada en Cutuglagua, cantón Mejía, provincia de Pichincha, Ecuador.

Las hojas frescas fueron deshidratadas (40 °C x 72 h), luego se retiró de forma manual las nervaduras para de esta forma ser trituradas hasta obtener un polvo con un tamaño de partícula de $\leq 40 \mu\text{m}$ y se almacenaron en recipientes de vidrio ámbar.

Preparación del extracto

Se empleó una relación 1:10 (peso /volumen); para cada ensayo se utilizaron 25 g de polvo y 250 mL de solvente. Se evaluaron: agua destilada, hidroetanol, etanol absoluto y butanol. Las mezclas permanecieron 24 h a temperatura ambiente. El extracto acuoso se sometió además a infusión a 90 °C durante 15 min. Luego se filtró, los extractos alcohólicos y butanólico se concentraron en rotavapor Biobase BK-RE-1A, China. Se configuró la temperatura del equipo en función del punto de ebullición de cada solvente, permitiendo la separación del compuesto alcohólico y la concentración del extracto final (Benítez et al., 2020).

Tamizaje fitoquímico

Para el tamizaje se emplearon sustratos de Hexano (2 % p/v), etanol (96 %) y agua (10 % p/v) donde el polvo de las hojas deshidratadas se macero durante 72 h. Los extractos obtenidos se filtraron con papel filtro Whatman No. 4, para luego ser analizados mediante pruebas cualitativas estándar con reactivos específicos de acuerdo con la metodología de (Miranda & Cuellar, 2001) que permite identificar varios metabolitos secundarios presentes en extractos de plantas.

Determinación de sólidos totales

El contenido de sólidos se determinó por triplicado mediante evaporación de 1 mL de extracto a 150 °C y cálculo por diferencia de masa (Tirado et al., 2015).

Encapsulación del Extracto

La encapsulación de los extractos se realizó mediante un secador por aspersión de la marca Büchi-mini B-290 (Flawil, Switzerland). El equipo operó con las condiciones establecidas por Egas-Astudillo et al., 2020. Donde la aspiración fue de 95 %, bomba de alimentación de 15 % y flujo de alimentación de 5.67 mL/min en la etapa de secado. Los materiales encapsulantes fueron maltodextrina en una proporción del 3, 5 y 7 % y goma xantana en una proporción del 0,25, 0,50 y 0,75 %, además se utilizó tres temperaturas de entrada del aire 120, 150 y 180 °C como variables dentro del proceso

Para la preparación de los tratamientos se tomó 75 mL de extracto y se ajustaron a 425 mL de agua destilada donde previamente se disolvió las diferentes proporciones de goma santana y maltodextrina propuestas para este estudio.

Luego del proceso de secado se estableció la humedad del polvo obtenido, para lo cual se tomó 1 g de polvo y se secó a 105 °C en una estufa de aire forzado Memmert PUF55, Alemania y el resultado se obtuvo por diferencia de peso de acuerdo con el método 934.06 de la AOAC, Para establecer la actividad de agua de los polvos se utilizó la metodología establecida por Testo 650 – Lenzkirch, Germany.

Compuestos fenólicos totales

Se determinaron utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu 2N. La absorbancia se midió a 754 nm mediante un espectrofotómetro Evolution 201 (Cachay-Morante et al., 2022) (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, EE. UU.), y los resultados se expresan en mg de ácido gálico/100 g de muestra seca (Waterhouse, 2002).

Contenido de clorofila y carotenoides

Se utilizó la metodología descrita por Pataro et al., 2015, con ciertas modificaciones, Se pesaron 0,125 g de muestras de polvo y se colocaron en un vaso de precipitación, añadiendo 15 mL de acetona. Esta mezcla se dejó reposar durante 48 horas. Una vez finalizada la extracción, las muestras se agitaron en un vórtex Labtron LVOM-A20, Granbretaña durante 15 minutos y luego se filtraron con papel filtro Whatman No. 4. El líquido filtrado se transfirió a un frasco de 25 mL, ajustando el volumen con acetona.

El extracto resultante se analizó a tres longitudes de onda: 662, 645 y 470 nm. A partir de estos valores, se calculó el contenido total de carotenoides utilizando las fórmulas correspondientes.

Para 100% acetona (en mg/L de extracto vegetal):

$$C_a = 11.75A_{662} - 2.35A_{645}$$

$$C_b = 18.61A_{645} - 3.96A_{662}$$

$$C_{x-c} = \frac{(1000A_{470} - 2.27C_a - 81.4C_b)}{227}$$

Donde

C_a = Contenido de clorofila a

C_b = Contenido de clorofila b

C_{x-c} = Contenido de carotenoides

Determinación de la capacidad antioxidante (ABTS⁺)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el ensayo ABTS⁺, siguiendo la metodología de Cachay-Morante et al. (2022) con modificaciones. Se realizó una doble extracción sucesiva agitando 0.5 g de polvo con 5 mL de metanol al 80% en vórtex por 30 min, seguido de centrifugación a 5000 rpm durante 10 min (Labtron LRF-A13, Reino Unido). Los sobrenadantes combinados se mantuvieron en reposo por 12 h en oscuridad a temperatura ambiente, se centrifugaron nuevamente bajo las mismas condiciones y se aforaron a 10 mL con el solvente de extracción. Para la reacción, se mezclaron 150 µL del extracto con 2850 µL de la solución de ABTS^{•+} diluida. Tras 20 min de incubación en oscuridad, se midió la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro Evolution 201 (*Thermo Fisher Scientific*, EE. UU.), empleando metanol al 80% como blanco. Los resultados se cuantificaron mediante una curva estándar de Trolox y se expresaron en µg equivalentes de Trolox por gramo de muestra (µg ET/g).

Análisis Estadístico

Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresan como media ± desviación estándar (Tabla 3). Los resultados obtenidos en los polvos se analizaron mediante el coeficiente de determinación, (R^2), el análisis de varianza (ANOVA), el diagrama de Pareto, diagramas de superficie de respuesta del diseño Box- BehnKen (Tabla 1) utilizando el software estadístico *Statgraphics Centurion* versión 16.03. La optimización multirrespuesta buscó maximizar fenoles y capacidad antioxidante, y minimizar humedad y actividad de agua.

Tabla 1. Diseño de Box-Behnken para la encapsulación y obtención del polvo.

Factores	Niveles Equidistantes		
	(+1)	(0)	(-1)
Contenido de Maltodextrina (% MD)	7	5	3
Contenido de Goma Xantana (% GX)	0.75	0.5	0.25
Temperatura de entrada del aire (TE °C)	180	150	120

Resultados y discusión

Caracterización inicial de las hojas

La identificación preliminar de metabolitos secundarios presentes en las hojas frescas permitió determinar la presencia de compuestos bioactivos como alcaloides, flavonoides, taninos y otros, los cuales pueden estar relacionados con las propiedades funcionales del material estudiado (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la marcha fitoquímica en hojas de ajo de monte.

Metabolito secundario	Prueba Específica	Resultado	Extracto		
			Hexano	Etanol	H ₂ O
Catequinas	Ensayo de catequinas	Aparición de mancha verde carmelita bajo UV	-	-	+++
Resinas	Ensayo de resinas	No se observó formación de precipitado	-	-	-
Compuestos lactónicos (Cumarinas)	Ensayo de Baljet	No se observó aparición de coloración o precipitado rojo	-	-	-
Cumarinas	Fluorescencia	Fluorescencia azul (OH en C7) o verde (furanocumarinas) bajo UV	+++	+++	+++
Triterpenos y/o esteroides	Ensayo de Liebermann-Burchard	Aparición de coloración rosado-azul muy rápido (+) Verde intenso muy rápido (++)	+	++	-
Saponinas	Ensayo de la espuma	Formación de espuma persistente	-	-	+++
Compuestos fenólicos	Ensayo del Cloruro Férrico	Rojo-vino (Compuestos fenólicos), Verde intensa (Taninos pirocatecólicos), Azul (Taninos pirogalotánicos)	-	+++	+++
Fenoles	Reacción de Rosenthaler	No se observó Aparición de coloración roja intensa	+	+	-
Taninos	Reacción con Gelatina	Formación de un precipitado	-	++	-
Antocianidinas	Ensayo de antocianidinas	Coloración roja o marrón en la fase amilica	-	++	-
Flavonoides	Ensayo de Shinoda	Coloración amarilla, naranja, carmelita o roja intensa en la fase de alcohol amílico	-	-	+
Flavonoides	Ensayo de Shinoda modificado	Coloración azul o verde en la fase de alcohol amílico	-	+++	-
Quinonas	Ensayo de Borntrager	No se observó coloración rosada (++) o roja (+++) en la fase acuosa alcalina	-	-	-
Alcaloides	Ensayo de Dragendorff	Opalescencia (+), turbidez definida (++) , o precipitado (+++)	-	-	+

Alcaloides	Ensayo de Mayer	No se observó Opalescencia (+), turbidez definida (++), o precipitado coposo (+++)	-	-	-
Alcaloides	Ensayo de Wagner	Opalescencia (+), turbidez definida (++), o precipitado (+++)	-	-	+
Compuestos grasos	Ensayo de Sudan	Película roja	++	++	++

Nota: Los símbolos representan la intensidad de la reacción observada: (-) ausencia, (+) baja presencia, (++) presencia moderada, (+++) alta presencia.

Se detectó una alta presencia de cumarinas en las tres fases de extracción (hexano, etanol y agua), indicadas por la fluorescencia azul o verde bajo luz UV, lo que sugiere una amplia distribución de estos compuestos. Además, se observó la presencia moderada de triterpenos y/o esteroides en el extracto etanólico y una significativa manifestación de compuestos fenólicos, taninos y flavonoides en las fases de etanol y agua, resaltando su posible contribución a las propiedades funcionales y antioxidantes del material estudiado.

Por otro lado, se detectó una baja presencia de alcaloides en la fase acuosa y una alta concentración de compuestos grasos en todas las fases de extracción, lo que indica un contenido lipofílico notable en las hojas. La ausencia o mínima detección de catequinas, resinas, compuestos lactónicos y quinonas, junto con los resultados de los ensayos específicos, subraya un perfil fitoquímico que respalda el potencial de este material para aplicaciones en la industria.

Composición funcional de las hojas frescas de Ajo de monte

Tabla 3. Compuestos funcionales presentes en la hoja frescas de ajo de monte

Muestra	CFT (mg/g)	AA (μ g Trolox/g)	Clorofila a (mg/L)	Clorofila b (mg/L)	Carotenoides (mg/L)
Hojas frescas de ajo de monte	3.79	521.02	8.141	13.241	0.648

Nota: CFT: contenido de fenoles totales, A.A: Actividad antioxidante

El análisis de las hojas de ajo de monte mostró un contenido fenólico total de 3.79 mg/g y una capacidad antioxidante de 521.02 μ g Trolox/g, lo que evidencia un alto potencial para la neutralización de radicales libres. Adicionalmente, se determinaron niveles de clorofila a (8,141 mg/L), clorofila b (13,241 mg/L) y carotenoides (0.648 mg/L). La elevada proporción de clorofila b señala una adaptación fisiológica de la planta a condiciones de sombra, una característica que define el tono verde del extracto final (Patel et al., 2013).

La acción sinérgica de estos compuestos bioactivos y pigmentos califica a la hoja como un ingrediente funcional idóneo para la industria alimentaria. Este comportamiento es consistente con los antecedentes de la especie *Mansoa alliacea*; Jeurkar et al. (2024) reportaron una actividad antioxidante significativa en extractos etanólicos foliares, mientras que Miranda et al. (2024) confirmaron esta robusta capacidad en extractos acuosos al registrar un IC₅₀ de 5.54 ± 1.48 μ g/mL mediante el ensayo DPPH.

Selección del medio de extracción

El extracto hidroetanólico alcanzó 11.30 % de sólidos totales, mientras que el etanólico registró 1.61 %. Los extractos butanólico y acuoso presentaron valores intermedios de 3.71 y 2.67 %, respectivamente. La mayor recuperación con la mezcla hidroetanólica se relaciona con la capacidad conjunta del agua y el etanol para solubilizar metabolitos polares y semi-polares. El resultado coincide con la importancia que tiene la composición del solvente en la recuperación de compuestos fenólicos y antioxidantes (Soto & Rosales, 2016). En consecuencia, la mayor capacidad extractiva del extracto hidroetanólico y la caracterización culitativa previa dio la pauta para la selección del medio de extracción en la encapsulación.

Selección de las mejores condiciones de encapsulamiento

En el conjunto de 15 tratamientos, la humedad se ubicó entre 0.132 y 1.300 %, y la actividad de agua entre 0.152 y 0.356 (Tabla 4). Estos valores muestran que la formulación y la temperatura modificaron la disponibilidad de agua y actividad de agua del polvo.

Tabla 4. Tratamientos representativos y respuestas analíticas.

Tratamiento	MD (%)	GX (%)	TE (°C)	Humedad (%)	Aw	CFT (mg EAG/g)	A.A (µg ET/g)
°1QQ	3	0.25	150	0.831 ± 0.044	0.305 ± 0.003	0.499 ± 0.003	102.479 ± 1.252
T2	7	0.25	150	0.713 ± 0.006	0.261 ± 0.004	0.486 ± 0.008	135.188 ± 1.250
T3	3	0.75	150	1.300 ± 0.018	0.343 ± 0.004	1.018 ± 0.006	271.438 ± 1.875
T4	7	0.75	150	0.132 ± 0.003	0.343 ± 0.004	0.696 ± 0.006	96.854 ± 1.909
T5	3	0.5	120	1.243 ± 0.129	0.356 ± 0.026	0.914 ± 0.014	115.604 ± 1.507
T6	7	0.5	120	0.781 ± 0.077	0.282 ± 0.006	0.514 ± 0.003	96.229 ± 1.573
T7	3	0.5	180	0.668 ± 0.007	0.217 ± 0.004	1.060 ± 0.003	227.688 ± 1.654
T8	7	0.5	180	0.325 ± 0.002	0.157 ± 0.007	0.696 ± 0.011	184.771 ± 1.909
T9	5	0.25	120	0.734 ± 0.085	0.248 ± 0.010	0.949 ± 0.012	241.021 ± 1.301
T10	5	0.75	120	0.656 ± 0.085	0.272 ± 0.005	1.086 ± 0.006	237.479 ± 1.301
T11	5	0.25	180	1.206 ± 0.028	0.304 ± 0.005	1.271 ± 0.008	226.021 ± 1.573
T12	5	0.75	180	0.165 ± 0.047	0.169 ± 0.004	1.112 ± 0.006	196.646 ± 1.909
T13	5	0.5	150	0.132 ± 0.001	0.171 ± 0.004	1.029 ± 0.006	135.188 ± 1.875
T14	5	0.5	150	0.231 ± 0.049	0.161 ± 0.010	0.996 ± 0.006	90.396 ± 2.195
T15	5	0.5	150	0.270 ± 0.099	0.152 ± 0.001	0.864 ± 0.006	137.479 ± 1.909

Nota. MD: maltodextrina; GX: goma xantana; TE: temperatura de entrada; Aw: actividad de agua; CFT: contenido de fenoles totales, A.A: Actividad antioxidante

Valorización de las hojas de ajo de monte (*Mansoa alliacea*) como ingrediente funcional

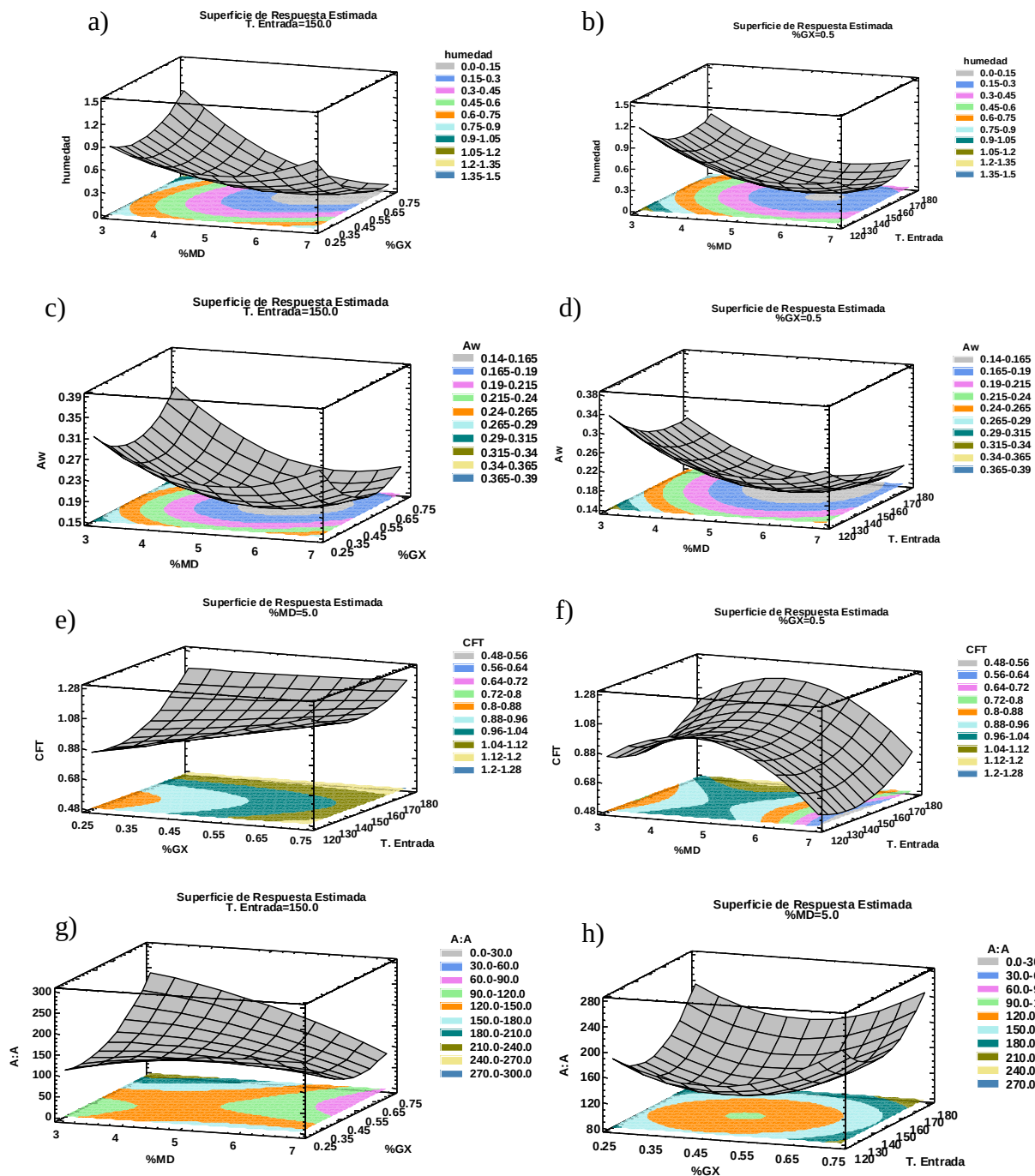


Figura 1. Superficies de respuesta obtenidas para la humedad (a y b), actividad de agua (c y d), fenoles totales (e y f) y capacidad antioxidante (g y h) alternando los componentes: TE °C ; % GX y % MD.

Nota: Aw: actividad de agua; A.A: Actividad antioxidante; CFT: Contenido de Fenoles totales.

El modelo matemático para la humedad explicó el 87.41 % de la variabilidad de los datos, un porcentaje idéntico al obtenido en el modelo de actividad de agua (A_w). El diagrama de Pareto demostró que el porcentaje de maltodextrina (%MD), el porcentaje de goma xantana (%GX) y la temperatura de entrada del aire al equipo (TE) son los factores con mayor influencia sobre la humedad del polvo. Dentro del modelo se observó que el %MD y la TE exhiben una relación negativa con la humedad, lo que significa que un incremento en estos parámetros contribuye a la disminución de la humedad en el producto final (Figuras 1a y 1b). Por el contrario, el %GX mostró una relación positiva y muy marcada, actuando directamente en el incremento de la humedad cuando se encuentra en concentraciones altas (Figura 1a).

En este sentido, el %MD ejerce el mayor impacto, lo que sugiere que su aumento retiene más agua. La goma xantana (%GX) también afecta esta propiedad, aunque en menor medida, debido a su hidrocoloidicidad y capacidad intrínseca de retención hídrica. Asimismo, la TE influye significativamente, ya que valores más altos favorecen la evaporación del solvente y reducen la humedad final.

Este comportamiento concuerda con el efecto de los solutos de alto peso molecular descrito para productos atomizados por Hicela (2010). De acuerdo con Guzmán y Castaño (2002), la humedad de los polvos está estrechamente relacionada con las condiciones operativas del proceso. Estos autores señalan que, mediante un control adecuado de dichos parámetros, es posible reducir significativamente la humedad del producto, mejorando así su estabilidad y conservación.

En cuanto a la actividad de agua (A_w), el diagrama de Pareto reveló que el %MD y la TE son las variables más influyentes. El modelo obtenido establece que los coeficientes lineales para el %MD y la TE son negativos, lo que indica que un aumento en sus niveles reduce la A_w (Figuras 1c y 1d). No obstante, el %GX presentó una relación positiva, promoviendo el incremento de la A_w (Figura 1d). A pesar de ello, las interacciones cuadráticas y cruzadas mostraron efectos compensatorios (algunos con signo positivo), lo que refleja que la influencia combinada de la maltodextrina y la goma xantana sobre la A_w no es estrictamente lineal.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que analizaron el efecto de la adición de solutos de alto peso molecular sobre las propiedades fisicoquímicas de productos en polvo. Adicionalmente, diversos estudios en la literatura científica establecen que un bajo contenido de A_w contribuye críticamente a la estabilidad microbiológica y química del producto. Por su parte, Schuck et al. (2014) reportaron que los solutos de alta densidad molecular generalmente actúan como una buena barrera contra la pérdida de A_w , observándose una reducción significativa de este parámetro al incrementar los niveles de maltodextrina y goma xantana.

Respecto al contenido de fenoles totales (CFT), el coeficiente de determinación (R^2) del modelo explicó el 87.12 % de la variabilidad, mientras que el modelo para la actividad antioxidante (AA) explicó el 94 % de la variabilidad. El diagrama de Pareto demostró que el %MD es el factor determinante en el encapsulamiento de los compuestos fenólicos. En el modelo respectivo, la TE mostró una relación negativa frente al CFT, indicando que temperaturas elevadas degradan o disminuyen estos compuestos en el polvo (Figura 1f). Por el contrario, los factores %GX y %MD exhibieron una relación positiva, lo que demuestra que ambos agentes actúan sinérgicamente en la retención y mantenimiento del CFT en el producto (Figuras 1e y 1f).

Estos resultados se alinean con lo expuesto por Díaz et al. (2023), quienes resaltan que la combinación de diferentes agentes encapsulantes es esencial para mejorar la estabilidad de compuestos termosensibles durante el secado. Dicha revisión enfatiza que la selección y proporción adecuada de polímeros, como la maltodextrina y la goma xantana, optimiza la protección de los componentes bioactivos y favorece su posterior liberación controlada.

Finalmente, para la AA, el diagrama de Pareto ratificó que el %MD es el factor de mayor influencia. Dentro de este modelo, la TE y el %GX mostraron una relación negativa frente a la AA, contribuyendo a su disminución (Figura 1h). En contraste, el %MD presentó una relación positiva, actuando como un protector eficaz para el mantenimiento de la capacidad antioxidante en el polvo (Figuras 1g y 1h).

Al respecto, Luna et al. (2017) mencionan que la correcta selección y optimización de la matriz encapsulante, junto con las condiciones de secado por aspersión, son claves para preservar la actividad antioxidante de los componentes bioactivos durante la microencapsulación. Asimismo, Saavedra-Leos et al. (2021) demostraron que el uso de maltodextrina al 5 % y una temperatura de entrada de 220 °C fueron óptimas para preservar los compuestos antioxidantes en jugos de brócoli secados por aspersión (con diferencias marcadas entre tallos y floretes). En la presente investigación sobre el ajo de monte, se observó que la combinación de goma xantana y maltodextrina, junto con una temperatura moderada de 180 °C, también favoreció la retención de la actividad antioxidante. Ambos estudios resaltan la importancia crítica de optimizar las variables de operación en el secado para preservar los principios activos, aun cuando la selección específica de los agentes portadores y la temperatura de proceso varíen en función de la naturaleza de la materia prima.

Optimizar el modelo Deseabilidad

La optimización de la deseabilidad se basa en la optimización del modelo obtenido para cada una de las respuestas experimentales mediante la combinación de los diferentes niveles de los factores en estudio en valores óptimos que generan un porcentaje de deseabilidad de los valores encontrados, Figura 2.

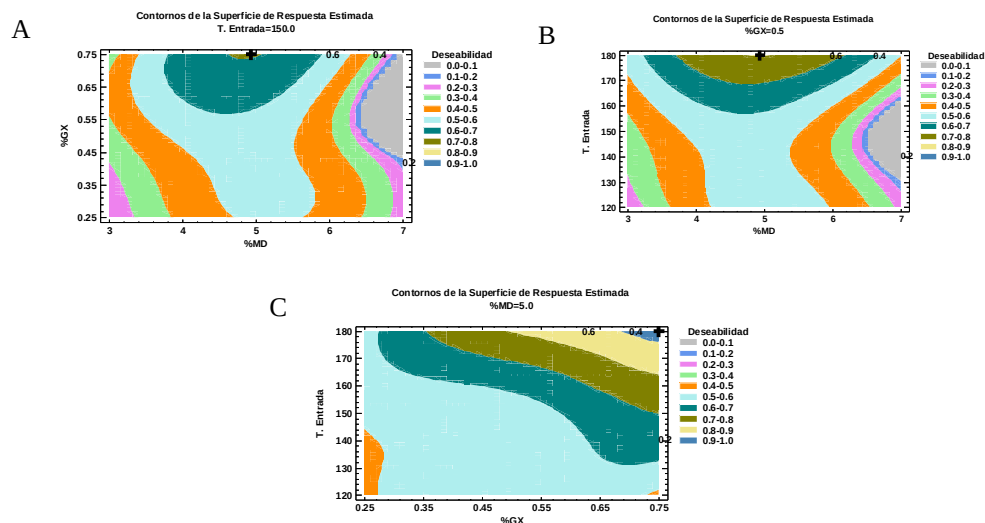


Figura 2. Contornos de superficie de respuestas obtenidas para la deseabilidad, alternando los componentes: T. Entrada (A); % GX (B) y % MD (C)

En la Gráfica A, se presenta la combinación de niveles que maximiza la función de deseabilidad. Aquí, el factor %MD se ubica en el 5 %, el factor %GX en 0.75 y el factor TE se mantiene en 150 °C; este punto se identifica visualmente con la cruz negra dentro de la región verde aceituna, donde se alcanza una deseabilidad del 70 al 80 %. Por su parte, en la Gráfica B, el factor %MD se encuentra en el 5 %, el factor TE en 180 °C y el factor %GX se mantiene en 0.5 %, situando también la deseabilidad en la región verde aceituna (70–80 %). En cambio, en la Gráfica C, el factor %GX se establece en 0.75 %, el factor TE en 180 °C y el factor %MD se mantiene en 0.5 %; bajo estas condiciones, la deseabilidad se traslada a la región azul, donde óptimamente se obtiene un valor del 90 al 100 %. En consecuencia, se determina que la mejor combinación de los niveles de los factores corresponde a la configuración de la Gráfica C, ya que es la única que permite maximizar la deseabilidad en el rango del 90 al 100 %.

Establecimiento de los óptimos

La optimización multirrespuesta estimó una deseabilidad de 93.76% con 4,94 % de maltodextrina, 0,75 % de goma xantana y 180 °C. Bajo esa combinación, el modelo predijo 251,669 µg Trolox/g de capacidad antioxidante, 0,16 de actividad de agua, 1,20937 mg EAG/g de fenoles y 0,18 % de humedad. Esta condición se aproxima al equilibrio entre retención de compuestos y estabilidad, aunque requiere validación experimental adicional porque se trata de valores predichos por el modelo y no de una corrida independiente de confirmación.

Tabla 4. Comparación de parámetros funcionales.

Parámetro	Hojas Frescas	Polvo (Tratamiento 12)	% de Retención
CFT	3.79 mg/g	1.112 mg/g	29.34
AA	521.02 µg trolox/g	196.646 µg trolox/g	37.74

Análisis de viabilidad funcional y retención

Los resultados demuestran que la interacción entre la maltodextrina y la goma xantana consolidó una matriz estructural capaz de mitigar el impacto térmico inherente al secado por aspersión. Aunque las altas temperaturas de entrada suelen comprometer la estabilidad de los compuestos termolábiles, el tratamiento óptimo retuvo el 37.74% de la capacidad antioxidante y un 29.34% de los compuestos fenólicos. Esta diferencia a favor de la retención antioxidante sugiere un efecto protector complementario; los pigmentos residuales (clorofilas a,b y carotenoides) o la formación de productos intermedios estables durante el tratamiento térmico podrían estar aportando activamente a la capacidad antioxidante global del polvo. En el ámbito del procesamiento térmico de especies silvestres, alcanzar retenciones del 30% al 40% valida la eficiencia técnica del proceso de microencapsulación frente a la degradación térmica Quiroga, P. (2021).

Conclusiones

El extracto hidroetanólico fue el medio más eficiente para recuperar sólidos de las hojas de *M. alliacea*, con 11.30 %, frente a 3,71 % para butanol, 2,67 % para agua y 1,61 % para etanol. La combinación de maltodextrina y goma xantana permitió modular la humedad, la actividad de agua y la retención de compuestos fenólicos durante el secado por aspersión. La condición multirrespuesta estimada fue 4,94 % de maltodextrina, 0,75 % de goma xantana y 180 °C, con deseabilidad de 93.76%. El polvo de hojas de ajo de monte constituye una fuente vegetal prometedora para el desarrollo de ingredientes funcionales antioxidantes. Esta conclusión es de carácter tecnológico preliminar y debe confirmarse mediante validación del punto óptimo, estudios de estabilidad, inocuidad y aplicación en alimentos.

Referencias

- A.H.Gentry.(2019). *Mansoa alliacea*. IPNI Life Sciences Identifier, 66(786).
<https://doi.org/urn:lsid:ipni.org:names:152672-2>
- Capillo, N., Calixto, M., Navarro, K., & Santisteban. (2020). Extraction and microencapsulation of antioxidant compounds from *Oenocarpus bataua* Mart seed. *Scientia Agropecuaria*, 11(4).
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.10>
- Chawla, P., Rana, R., Sridhar, K., & Inbaraj, B. (2024). Green and sustainable extraction techniques for bioactives in food, plants, pharmaceuticals, and cosmetics. *Frontiers in Chemistry*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1388362>
- Davila, J., Calero, A., Roldan, S., & Benítez, F. (2010). Ingredientes funcionales de plantas ecuatorianas. *Revista Politécnica*, 29(1), 51–59. <https://doi.org/10.33333/RP.V29I1.288>
- Díaz, Cerón, & Vargas. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática. *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 17–28.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9575>
- Egas-Astudillo, L. A., Martínez-Navarrete, N., & Camacho, M. M. (2020). Impact of biopolymers added to a grapefruit puree and freeze-drying shelf temperature on process time reduction and product quality. *Food and Bioproducts Processing*, 120, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.004>

- Hicela, L. (2010). Influencia de la humedad y de la adición de solutos (maltodextrina o goma arábica) en las propiedades fisicoquímicas de borojó y fresa en polvo [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/9035>
- Luna, J., López, M., Jiménez, O., & Luna, L. (2017). Microencapsulación de algunos compuestos bioactivos mediante secado por aspersión. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10). <https://ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/56/264>
- Quiroga, P. (2021). Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en los extractos de hojas y tallo de ajos sacha (*Mansoa alliacea*), efecto de la temperatura y pH en su estabilidad. Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1969>
- Soto, M., & Rosales, M. (2016). Efecto del solvente y de la relación masa/solvente sobre la extracción de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de extractos de corteza de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 18(4), 701–714. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000061>
- Benítez, R., Sarria, R., Gallo, J., Pérez, N., Álvarez Sandoval, J. H., & Giraldo Aristizábal, C. (2020). Obtención y rendimiento del extracto etanólico de dos plantas medicinales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 15(1), 31–38. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3597>
- Rios, S., Gil, & Andrea. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *TecnoL*, 24(51). <https://doi.org/10.22430/22565337.1836>
- Rosales, M., González-Laredo, R., Rocha-Guzmán, N., Gallegos-Infante, J., Peralta-Cruz, J., y Karchesy, J. (2009). Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 15(3), 87-105. https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000300005&lng=es&tlng=es
- Ruano, D., Ciro, H., y Sepúlveda, U. (2018). Estudio cinético de algunas características de calidad de un producto en polvo obtenido mediante secado por aspersión. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 127-140. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6469088.pdf>
- Samborska, K. (2022). Innovaciones en procesos de secado por atomización para industrias alimentarias y farmacéuticas. *Revista de Ingeniería de Alimentos*, 321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110960>
- Sánchez, D., Montoya, C., Bazán, J., Gutierrez, C., y Rojas, M. (2022). Effect of Drying by Lyophilization and Atomization on the Characteristics and Properties of Fruit Powders: A Systematic Review. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 18(22). https://doi.org/https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FP104.pdf
- Sanchez, E. (2015). Estudio del ajo de monte (*Mansoa Aliácea*) y sus propiedades: su uso gastronómico y medicinal en la comuna Chiguilpe de Santo Domingo de los Tsáchilas. *Revista Uniandes Episteme*, 2(2), 185–193. <https://doi.org/https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/68>

- Sánchez, E. (2015). Estudio del ajo de monte (*Mansoa Aliácea*) y sus propiedades: su uso gastronómico y medicinal en la comuna Chiguilpe de Santo Domingo de los Tsáchilas.: *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación.*, 2(2), 185–193. <https://doi.org/https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/68>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (11 de 12 de 2022). *El portal único del gobierno*. Elaboración de Extractos Vegetales: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737322/10_Extractos_vegetales.pdf
- Selvamuthukumar, M. (2019). Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries. *Engineering & Technology, Food Science & Technology*, 362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429055133>
- Siccha, A., y Loe, O. (2019). Secado por atomización (spray dryer). *Revista de Química*, 9(1). <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/8354/8661/?>
- Soto, M., y Rosales, M. (2016). Efecto del solvente y de la relación masa/solvente sobre la extracción de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de extractos de corteza de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(4), 701 - 714. <https://doi.org/DOI:10.4067/S0718-221X2016005000061>
- Tirado, D., Montero, P., y Acevedo, D. (2015). Estudio Comparativo de Métodos Empleados para la Determinación de Humedad de Varias Matrices Alimentarias. *Información Tecnológica*, 26(2), 3-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200002>
- Towne, C., y Ray, D. B. (2020). Journal of Medicinal Plants Research Effect of *Mansoa alliacea* (Bignoniaceae) leaf extract on embryonic and tumorigenic mouse cell lines. *ResearchGate*, 9(29), 799-805. <https://doi.org/10.5897/JMPR2015.5823>
- Vázquez, A. (2022). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/24220582.4023>
- zhuang, Long, J.-t., Gong, Z.-f., Nong, K.-y., Liang, X.-m., Qin, T., . . . Yang, L. (2021). Current State of Knowledge on the Antioxidant Effects and Mechanisms of Action of Polyphenolic Compounds. *Natural Product Communications*, 16(7). <https://doi.org/doi:10.1177/1934578X211027745>