

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Caracterización de microcápsulas a partir de extractos de pulpa de capulín obtenidos por ultrasonido y microondas

Characterization of microcapsules from capulín pulp extracts obtained by ultrasound and microwave-assisted extraction

Authors/Autores: Valdés-González, D.A., Tochiuitl-Martíñón, A., Sánchez-Becerril, M., Borrás-Enríquez, A. J., Tochiuitl-Martíñón, G.A.

ID: e2024

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2024>

Received/Fecha de recepción: July 10th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: March 12th 2026

Available online/Fecha de publicación: April 21th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Valdés-González, D.A., Tochiuitl-Martíñón, A., Sánchez-Becerril, M., Borrás-Enríquez, A. J., Tochiuitl-Martíñón, G.A. (2026). Characterization of microcapsules from capulín pulp extracts obtained by ultrasound and microwave-assisted extraction. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2024. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2024>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.






Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Caracterización de microcápsulas a partir de extractos de pulpa de capulín obtenidos por ultrasonido y microondas

Characterization of microcapsules from capulín pulp extracts obtained by ultrasound and microwave-assisted extraction

Microcápsulas de capulín/

Microcapsules of capulín

Valdés González, D.A.¹ , Tochihuitl Martiñón, A.¹ , Sánchez Becerril, M.¹ , Borrás Enríquez, A. J.² , Tochihuitl Martiñón, G.A.^{3*} 

¹División de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso. Av. Instituto Tecnológico, S/N, ejido de San Felipe del Progreso, 50640, Estado de México, México.

²Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores Campus Ciudad Valles. Carr. al Ingenio Plan de Ayala Km. 2, Col. Vista Hermosa. Cd. Valles. 79010, San Luis Potosí, México.

³INIFAP-Campo Experimental General Terán. Km. 31 Carretera Montemorelos-China, Exhacienda Las Anacuas, General Terán, 67400, Nuevo León, México.

*Corresponding Author:

Guillermina Areli Tochihuitl- Martiñón. INIFAP-Campo Experimental General Terán. Km. 31 Carretera Montemorelos-China, Exhacienda Las Anacuas, General Terán, 67400, Nuevo León, México. Telefono: (55) 38718700 Ext. 83610. E-mail: tochihuitl.areli@inifap.gob.mx

RESUMEN

Los frutos de capulín son una fuente potencial de compuestos bioactivos, los cuales pueden ser empleados principalmente en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, la presente investigación tuvo como objetivo la caracterización fisicoquímica de microcápsulas elaboradas con alginato de calcio y goma arábiga como agentes encapsulantes, utilizando extractos de pulpa de capulín obtenidos mediante tecnologías de extracción asistida por ultrasonido y microondas. Las microcápsulas obtenidas se clasificaron en tres grupos: frescas, liofilizadas y rehidratadas, cada grupo se sometió a una caracterización donde se evaluaron las dimensiones, forma, textura, color, contenido fenólico y actividad antioxidante. En los resultados, las microcápsulas presentaron dimensiones de 1.25 ± 0.35 a 3.05 ± 0.78 mm de largo y 1.15 ± 0.07 a 2.40 ± 0.14 mm de ancho; formas esféricas e irregulares; texturas rugosas y lisas; colores entre rosa-amarillo-naranja y verde; contenido fenólico promedio de 0.79 ± 0.22 y de 1.23 ± 0.35 mg GAE g⁻¹ dw y una actividad antioxidante de 5.47 ± 0.29 y 6.23 ± 0.74 mg TE g⁻¹ dw. La microencapsulación con alginato de calcio y goma arábiga permitió preservar compuestos bioactivos del capulín, desde el punto de vista morfológico, las microcápsulas frescas presentaron formas más definidas, texturas lisas, colores más agradables y saturados.

PALABRAS CLAVE:

Prunus serotina, actividad antioxidante, contenido fenólico.

ABSTRACT

Capulin fruits are a potential bioactive compounds source that can be used mainly in the pharmaceutical, cosmetic, and food industries. This study aimed to characterize the physicochemical properties of microcapsules made with calcium alginate and gum arabic as encapsulating agents, using capulin pulp extracts obtained through ultrasound-assisted and microwave extraction. The microcapsules produced were categorized into three groups: fresh, freeze-dried, and rehydrated. Each group was characterized by assessing dimensions, shape, texture, color, phenolic content, and antioxidant activity. The results showed that the microcapsules ranged in length from 1.25 ± 0.35 to 3.05 ± 0.78 mm and in width from 1.15 ± 0.07 to 2.40 ± 0.14 mm; with spherical or irregular shapes; rough or smooth textures; and colors ranging from yellow-orange-pink to green. The average phenolic content was 0.79 ± 0.22 and 1.23 ± 0.35 mg GAE g^{-1} dw, and the antioxidant activity was 5.47 ± 0.29 and 6.23 ± 0.74 mg TE g^{-1} dw. Microencapsulation using calcium alginate and gum arabic helped preserve the bioactive compounds of the capulin fruit. Morphologically, the fresh microcapsules showed more defined shapes, smoother textures, and more vibrant, saturated colors.

KEYWORDS:

Prunus serotina, antioxidant activity, phenolic content.

Introducción

En el año 2023, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] reportó una producción de 114.28 toneladas de capulín por el Estado de México, Puebla, Ciudad de México y Jalisco. En los municipios de Santa María Citendeje y Jocotitlán (Estado de México), el capulín es usado de forma medicinal, como combustible, forraje, y ebanistería (López *et al.*, 2024).

Los frutos de capulín *Prunus serotina* subsp. *capuli* (Cav.) McVaugh son apreciados por su agradable sabor, se consumen de manera fresca o en la elaboración de conservas, tamales, bebidas fermentadas y productos tradicionales como té medicinal (Jiménez *et al.*, 2011; Guzmán *et al.*, 2020). La pulpa, cáscara del fruto y subproductos obtenidos de la almendra (cáscara, pasta y aceite) poseen compuestos bioactivos, entre los cuales destacan los polifenoles, que les confieren una importante capacidad antioxidante y efectos antimicrobianos (Jiménez *et al.*, 2011; Luna-Vázquez *et al.*, 2013; Gallardo *et al.*, 2021).

La obtención de compuestos bioactivos se realiza empleando métodos como la extracción asistida por microondas (MAE) y extracción asistida por ultrasonido (UAE), el primer método es uno de los más populares y rentables (Delazar *et al.*, 2012), utiliza energía para calentar la humedad presente en el material vegetal o en los solventes en contacto, se realiza en pocos minutos, con un mayor rendimiento y un menor consumo de solvente, siendo amigable con el medio ambiente (Desai *et al.*, 2010), mientras que el segundo método (UAE) es dependiente de la potencia ultrasónica que se aplique al medio y el tiempo de extracción (Corona *et al.*, 2016). La UAE es una alternativa ecológica, económicamente viable para alimentos y productos naturales, entre sus beneficios se encuentran la disminución del tiempo de extracción y procesamiento, así como la cantidad de energía y solventes utilizados (Chemat *et al.*,

2017). La mayor tasa de extracción generalmente se logra en los primeros minutos, que son el período más rentable (Esclapez *et al.*, 2011).

Los polifenoles son considerados parte de los compuestos bioactivos más potentes que sintetizan las plantas, por su capacidad para eliminar directamente especies moleculares de oxígeno activo y su habilidad para donar átomos de hidrógeno o electrones, además, muestran una combinación única de actividades químicas, biológicas, igual que fisiológicas, sin embargo, presentan una falta de estabilidad a largo plazo, lo que hace que estos compuestos naturales sean muy sensibles a la luz y al calor. A menudo presentan una biodisponibilidad reducida, principalmente debido a su baja solubilidad en agua (Munin & Edwards-Lévy, 2011).

Una técnica prometedora y novedosa que permite proteger a los compuestos bioactivos, fortalecer su estabilidad oxidativa y controlar la liberación de compuestos específicos es la encapsulación (Di *et al.*, 2022). Se pueden utilizar diversos métodos de encapsulación, ya sean físicos o químicos, y su uso está intrínsecamente ligado a su aplicación (Assis *et al.*, 2023). Entre las múltiples variaciones como aplicaciones, se encuentran la micro y nanoencapsulación (Alu'datt *et al.*, 2022). Algunos parámetros de calidad considerados en los métodos de encapsulación son: el análisis de humedad, cenizas, rendimiento, morfología, tamaño de las microcápsulas y color (Parra, 2010).

El desarrollo de micro o nanocápsulas cargadas con polifenoles, carotenoides, ácidos grasos, fitoesteroles, probióticos, vitaminas, minerales y péptidos bioactivos de fuentes naturales, permiten mejorar la estabilidad, solubilidad, biodisponibilidad, las propiedades sensoriales, retención de propiedades bioactivas y la microestructura, la reducción de la higroscopicidad, así como, un aumento de la vida útil (Zabot *et al.*, 2022). En la industria alimentaria los polifenoles microencapsulados se utilizan como ingredientes en productos funcionales, bebidas, lácteos y panadería, donde por sus conservantes naturales desempeñan una función tanto enriquecedora como protectora, inhibiendo eficazmente el crecimiento de bacterias, mohos y levaduras (Bińkowska *et al.*, 2024).

En la industria cosmética y farmacéutica se ha adoptado la encapsulación de polifenoles como una estrategia innovadora, especialmente en los sectores de los cosmeceúticos y nutracéuticos, esta técnica aplicada a los polifenoles es capaz de reducir su impacto sensorial, superar la inestabilidad, favorecer la penetración cutánea y mejorar la flexibilidad en la formulación de productos cosméticos (Rispo *et al.*, 2024).

En relación con lo previamente descrito, el objetivo de esta investigación fue realizar la caracterización fisicoquímica de microcápsulas elaboradas con alginato de calcio y goma arábiga como agentes encapsulantes, utilizando extractos de pulpa de capulín obtenidos mediante tecnologías de extracción asistida por ultrasonido y microondas.

Material y Métodos

Material vegetal

Frutos de *Prunus serotina* subsp. *capuli* (Cav.) McVaugh fueron cosechados en Barrio Tungareo, San Felipe del Progreso, Estado de México (19° 39' 41.57" N, 19° 53' 55.21" W), una vez recolectados se trasladaron al laboratorio de ingeniería en industrias alimentarias del Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso, donde se seleccionaron aquellos que presentaban una coloración de rojizo-negra, textura blanda y sin daños físicos. Se les retiró la semilla o almendra y fueron lavados con agua destilada. Una parte de los frutos fue reservada para su posterior evaluación, y otra se sometió a un proceso de deshidratación a 52 °C durante 20 horas con un deshidratador (CHEFMAN RJ43-ROB-5, voltaje de 110V).

Extracción asistida por ultrasonido y microondas

De manera separada, a 10 g de pulpa fresca y 10 g de pulpa deshidratada, se les adicionaron 100 mL de agua destilada para ser llevadas a extracciones asistidas por ultrasonido y microondas.

Para la UAE y MAE se empleó el método de Pinzón & Gómez (2020) con ligeras modificaciones; en el primer caso, las muestras se sometieron a un baño de ultrasonido (110 V) en intervalos de 20 segundos, intercedidos por pausas de 40 segundos, hasta alcanzar 1 h, una vez concluido el tiempo, los extractos acuosos se centrifugaron por 15 min a 400 rpm y los sobrenadantes se reservaron. En el segundo método de extracción, las muestras se colocaron en un microondas (700 W) por 2 min, los extractos se centrifugaron por 15 min a 400 rpm y los sobrenadantes se reservaron.

Microencapsulación de los extractos

Se usó el método de Calero *et al.* (2008), con algunas modificaciones, a los sobrenadantes obtenidos de los extractos acuosos: extracto de pulpa fresca por ultrasonido (EFU), extracto de pulpa deshidratada por ultrasonido (EDU), extracto de pulpa fresca por microondas (EFM) y extracto de pulpa deshidratada por microondas (EDM), se les adicionaron 2 g de alginato de calcio - goma arábica (3:1), la mezcla se homogeneizó y se transfirió a una jeringa desechable (3 mL x 32 mm), esto con la intención de generar gotas, las cuales caían sobre una solución de cloruro de calcio (14.60%). Una vez obtenidas las microcápsulas, estas fueron retiradas de la solución, unas se reservaron en su estado original (frescas), otras más se liofilizaron (Freezer Dryer, EGO-FD10PT, 110/60 V) durante 24 h a -37.60 °C (liofilizadas) y, parte de las ya liofilizadas se hidrataron (rehidratadas). Sólo a las microcápsulas frescas se les determinaron el porcentaje de humedad, las cenizas y el rendimiento.

Determinación del porcentaje de humedad, cenizas y rendimiento

La humedad (%), se determinó de acuerdo a la NOM-116-SSA1-1994 con algunas modificaciones; de 3.00 g, 1.00 g, 0.80 g, 0.70 g y 0.50 g de microcápsulas por tratamiento, se colocaron en un horno (Marla, Mod J-01 a 220 V) a 110 °C por 2 h, posteriormente, se enfriaron las cápsulas en un desecador de vidrio y finalmente se

registró el peso de cada cápsula en una balanza analítica (Eletronic Compact Scale, Mod. SF-400 C). El porcentaje de humedad se calculó mediante la Ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1. Humedad (\%)} = \frac{(P_1 - P_2)}{m} \times 100$$

Donde:

P_1 = peso de la muestra.

P_2 = peso del vidrio de reloj más la muestra seca.

m = peso de la muestra.

Las cenizas (%) se calcularon conforme a la NMX-Y-362-SCFI-2019, 0.50 g de microcápsulas de cada tratamiento, se pusieron en un horno (Marla, Mod J-01 a 220 V) a una temperatura de 550 °C por 2 h, el cálculo se hizo de acuerdo a la Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2. Cenizas (\%)} = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \times 100$$

Donde:

P_2 = peso del crisol con las cenizas.

P_1 = peso del crisol con la muestra.

P_0 = peso del crisol vacío.

El rendimiento (%) se calculó de acuerdo a Dincer & Temiz (2023); se consideró el peso de las microcápsulas frescas y las microcápsulas liofilizadas, los resultados obtenidos se reportaron en porcentaje, Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3. Rendimiento (\%)} = \frac{P_{mf}}{P_{ml}} \times 100$$

P_{mf} = Peso microcápsulas frescas.

P_{ml} = Peso de microcápsulas liofilizadas.

Caracterización de microcápsulas frescas, liofilizadas y rehidratadas

El tamaño fue determinado con el software ImageJ v1.53 (National Institutes Health, Bethesda, MD, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>), se midió el largo y ancho de las microcápsulas, los resultados se reportaron en milímetros (mm).

La forma se describió con la ayuda de un microscopio óptico (Velab, stereo vesla), los resultados se reportaron como esférica o irregular.

La textura se caracterizó a partir de la estructura externa observada en las microcápsulas, la cual se clasificó como lisa o rugosa.

El color se midió en el centro de la microcápsula, con la ayuda del programa ImageJ. Los valores reportados fueron luminosidad (L), el ángulo de tono o °Hue (Ecuación 4) y Croma (Ecuación 5), de acuerdo con Lancaster *et al.* (1997).

$$\text{Ecuación 4. } \text{°Hue} = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

$$\text{Ecuación 5. } \text{Croma} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Contenido fenólico y actividad antioxidante

Se determinaron en microcápsulas liofilizadas mediante la metodología descrita por Borrás *et al.* (2021). Los resultados de contenido fenólico se reportaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por g de muestra en peso seco (mg GAE g⁻¹ dw), mientras que la actividad antioxidante determinada mediante el método 2,2-difenil-1-picril-hidrazilo (DPPH), se registró en miligramos de Trolox equivalente por g de peso seco (mg TE g⁻¹ dw).

Análisis estadístico

Se aplicó un ANOVA para el análisis de resultados de porcentaje de humedad, cenizas y tamaño de las microcápsulas, en este último caso, se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) en el programa estadístico Statistica v.7.1, USA.

Resultados y Discusión

Humedad

La humedad promedio de las microcápsulas fue de 21.00%. Los valores más altos se observaron en las formuladas con extractos de UAE ($23.00 \pm 6.9\%$) y los más bajos en las elaboradas con extractos de MAE ($19.00 \pm 4.83\%$), no obstante, el análisis de varianza aplicado a los datos de humedad considerando el método de extracción, indicó que no existió diferencia significativa entre ambos ($\alpha = 0.05$, $p = 0.2907$), lo cual, sugiere que la variación observada no puede atribuirse al procedimiento de extracción. En contraste, Ramos *et al.* (2024) reportaron valores de humedad de 7.19% a 8.17%, los cuales favorecen el almacenamiento y prolongan la vida útil de las microcápsulas. Cabe señalar que la humedad puede estar influenciada por la composición química del material de la pared y el acondicionamiento previo del material a encapsular (Carrillo-Navas *et al.*, 2011; Liau *et al.*, 2025). En el presente estudio no se consideró el uso de un desecador para minimizar los efectos de la humedad ambiental en el acondicionamiento previo, lo que pudo influir en los resultados obtenidos.

Cenizas

Se registró un alto contenido de cenizas en las microcápsulas (UAE= $39.25 \pm 5.34\%$, MAE = $38.00 \pm 4.46\%$), esto se le atribuye a la presencia del 15.00% de alginato de calcio, el cual contrasta con otros encapsulados con la misma formulación, donde la solución empleada fue del 2.00% (Viveros-Contreras *et al.*, 2012; Sukanya *et al.*, 2022). Asimismo, Gómez (2018) mencionó que los encapsulados con goma arábica muestran un mayor contenido de cenizas debido a los componentes de material inorgánico que se quedan alojados entre la red que forma el polímero, de manera análoga, el uso de alginato de calcio - goma arábica genera un efecto semejante, ya que son biopolímeros. El análisis de varianza de los datos obtenidos de ceniza en función del método de extracción no presentó diferencia significativa ($\alpha = 0.05$, $p = 0.1478$).

Rendimiento

En promedio, el rendimiento de las microcápsulas fue de 76.00%, el porcentaje más bajo se presentó en la UAE (EFU= 48.50%) y el más alto en la MAE (EDM= 91.25%). Al respecto, Paini *et al.* (2015) reportaron haber obtenido un alto rendimiento en la microencapsulación de compuestos fenólicos (94.00%), en tanto que Enascuta *et al.* (2025) obtuvieron un 87.11% al encapsular compuestos bioactivos, estos autores, mencionaron que la variación en los rendimientos puede atribuirse a la concentración que existe entre el agente encapsulante y el compuesto de interés a encapsular, ya que un incremento en dicha concentración se refleja en un aumento de la masa de las microcápsulas. Asimismo, el tiempo de goteo constituye un factor determinante, periodos prolongados (30 min) tienden a reducir el rendimiento debido a la probabilidad de fusión entre las gotas que se encuentran en la solución. El proceso de formación de microcápsulas también es relevante, pues gotas de mayor tamaño forman encapsulados no homogéneos, con posibles defectos de recubrimiento que los hacen susceptibles de perder parcialmente el compuesto de interés.

En relación con la influencia del método de extracción (UAE y MAE) sobre el rendimiento de las microcápsulas, se ha evidenciado que la técnica de MAE genera alteraciones en la estructura superficial del material y produce partículas de menor tamaño en comparación con UAE (Hamamouche *et al.*, 2024), lo que favorece su incorporación a la matriz encapsulante y, por ende, incrementa el rendimiento. En el caso del EDM, que presentó el mayor rendimiento, este resultado se atribuyó a la aplicación de MAE y deshidratación, ya que durante el proceso de deshidratación se reduce significativamente el contenido de humedad y se mejoran las propiedades de porosidad (Ali *et al.*, 2025), permitiéndole una mayor interacción con los agentes encapsulantes.

Caracterización de microcápsulas frescas, liofilizadas y rehidratadas

En la Tabla 1 se muestran las características de tamaño (mm), forma (esférica-irregular) y textura (rugosa-lisa) de los tres grupos de microcápsulas (frescas, liofilizadas y rehidratadas) obtenidas a partir de extractos de UAE y MAE. El análisis de varianza realizado para comparar el tamaño entre los tres grupos de microcápsulas

mostró diferencias significativas, por lo que se efectuó una prueba de comparación de medias, cuyos resultados indicaron que las microcápsulas liofilizadas presentaron, en su mayoría, los menores valores de tamaño.

Las microcápsulas obtenidas de extracciones por ultrasonido presentaron dimensiones promedio a lo ancho de 1.15 ± 0.07 mm en microcápsulas liofilizadas (EDU), mientras que en microcápsulas frescas el valor promedio fue de 2.40 ± 0.14 mm (EFU).

Las microcápsulas obtenidas de extracciones por microondas presentaron una dimensión a lo largo de 1.25 ± 0.35 mm en microcápsulas liofilizadas (EDM) y 3.05 ± 0.78 mm en microcápsulas rehidratadas (EFM). Los resultados en el presente trabajo se aproximan a los reportados por Singh *et al.* (2010), quienes mencionaron que el tamaño de microcápsulas varía entre $50.00 \mu\text{m}$ y 2.00 mm. Por otro lado, Sánchez-Molina *et al.* (2018) señalaron que las variaciones de dimensión que se puedan presentar, dependen de la proporción entre el extracto líquido y el material encapsulante.

Las microcápsulas frescas formadas de extractos por ultrasonido presentaron una apariencia definida (EFU y EDU= forma esférica y textura lisa) en comparación con las microcápsulas frescas constituidas de extractos por microondas (EFM y EDM= forma irregular y textura rugosa). Las microcápsulas liofilizadas, en ambos tipos de extracción (UAE y MAE) presentaron una forma irregular y textura rugosa, esto concuerda con lo reportado por Trujano & Lozano (2020), quienes mencionaron que las microcápsulas al ser sometidas a liofilización presentan una morfología irregular, lo que se le atribuye al proceso de secado debido a la sublimación de agua que da lugar a una textura porosa, por esta razón las microcápsulas liofilizadas presentaron formas irregulares y con menor tamaño, lo que facilita la liberación de sustancias activas, mejora las propiedades de absorción y bioadhesión, siendo favorable en áreas como la medicina.

En lo referente a color, las microcápsulas frescas de UAE presentaron colores del rosa al rojo (EFU y EDU= 19.04°Hue y 22.35°Hue), mientras que las obtenidas de MAE del naranja al amarillo (EFM y EDM= 51.15°Hue y 55.26°Hue), los valores de Cromo estuvieron entre $32.00 - 39.00$ de UAE y MAE, respecto a la luminosidad los valores fueron inferiores a 32.00 , siendo EDM el más bajo con 19.90 y EFU el más alto con 31.80 (Figura 1). Las microcápsulas liofilizadas de UAE mostraron una coloración verde (EFU y EDU= 162.44°Hue y 175.40°Hue), en tanto que las de MAE fueron del naranja al verde (EFM y EDM= 112.14°Hue y 43.79°Hue), los valores de Cromo oscilaron entre $21.00 - 37.00$, donde MAE tuvo valores inferiores a 23.00 , la luminosidad se mantuvo entre $26.00 - 32.00$, siendo EDU el menor valor con 26.96 y EFM el mayor con 31.75 (Figura 2). Las microcápsulas rehidratadas de UAE presentaron tonalidades del rosa al rojo (EFU y EDU= 15.87°Hue y 20.56°Hue), mientras que las de MAE tendieron al color verde (EFM y EDM= 177.71°Hue y 164.89°Hue), los valores de Cromo fueron entre $12.00 - 19.00$ en MAE y entre $31.00 - 33.00$ en UAE, la luminosidad osciló entre $26-39$, siendo EFU el de menor valor con 26.13 y EDM el mayor con 38.34 (Figura 3).

Tabla 1. Caracterización de microcápsulas frescas, liofilizadas y rehidratadas.

	Fresh		Lyophilized		Rehydrated		Fresh	Liophilized	Rehydrated	Fresh	Liophilized	Rehydrated
	Length (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Form (Spherical- Irregular)			Texture (Rough- Smooth)		
EFU	2.50 ± 0.28 ^a	2.40 ± 0.14 ^a	1.60 ± 0.14 ^b	1.50 ± 0.42 ^b	2.25 ± 0.07 ^a	2.25 ± 0.35 ^{ab}	Spherical	Irregular	Irregular	Smooth	Rough	Smooth
EDU	2.70 ± 0.42 ^a	2.35 ± 0.49 ^a	1.66 ± 0.07 ^b	1.15 ± 0.07 ^b	2.45 ± 0.21 ^a	1.90 ± 0.28 ^a	Spherical	Irregular	Irregular	Smooth	Rough	Smooth
EFM	2.20 ± 0.42 ^b	2.05 ± 0.35 ^a	1.90 ± 0.14 ^b	1.50 ± 0.00 ^b	3.05 ± 0.78 ^a	2.10 ± 0.28 ^a	Irregular	Irregular	Irregular	Rough	Rough	Smooth
EDM	2.65 ± 0.50 ^a	2.20 ± 0.28 ^a	1.25 ± 0.35 ^b	1.30 ± 0.14 ^b	2.30 ± 0.42 ^a	2.05 ± 0.21 ^a	Irregular	Irregular	Irregular	Smooth and Rough	Rough	Smooth

EFU = extracto de pulpa fresca por ultrasonido, EDU = extracto de pulpa deshidratada por ultrasonido, EFM = extracto de pulpa fresca por microondas y EDM = extracto de pulpa deshidratada por microondas. Valores con diferente letra en largo y ancho de cada fila (comparando microcápsulas frescas, liofilizadas y rehidratadas), son estadísticamente diferentes, Tukey; $p \leq 0.05$. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de tamaño, forma y textura de las microcápsulas.

En relación con lo antes descrito, las microcápsulas frescas presentaron colores rosas a amarillo, al ser liofilizadas las tonalidades fueron de naranja a verde y al rehidratarse las microcápsulas de UAE volvieron a su color rosa a rojo, mientras que las de MAE presentaron tonalidad verde, los valores de Croma fueron mayores en microcápsulas frescas y fueron disminuyendo con el proceso de liofilización y rehidratación, los valores más altos de luminosidad se presentaron en las microcápsulas rehidratadas, lo cual puede deberse a la presencia de agua. Considerando los parámetros de color evaluados, las microcápsulas con una presentación visualmente óptima fueron las frescas EFU, por tener una coloración más rojiza (característica de la pulpa de capulín), mayor saturación de color (valor de Croma) y luminosidad.

Una investigación hecha por Dincer & Temiz (2023) en microcápsulas liofilizadas de *Pyracantha coccinea* var. *lalandi* mencionaron que las microcápsulas presentaron valores de $^{\circ}\text{Hue} = 65.85$, $\text{Croma} = 17.23$ y $L = 77.54$, en comparación a los valores aquí reportados, los $^{\circ}\text{Hue}$ fueron semejantes, la saturación de color fue mayor y la luminosidad fue baja, la cual, se le puede atribuir a la concentración de la solución de cloruro de calcio que se empleó.

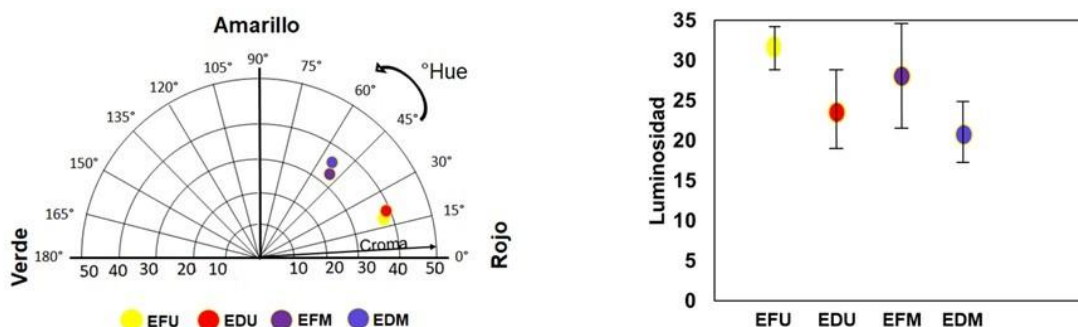


Figura 1. Distribución de Luminosidad, $^{\circ}\text{Hue}$ y Croma de microcápsulas frescas, obtenidas de EFU= extracto de pulpa fresca por ultrasonido, EDU= extracto de pulpa deshidratada por ultrasonido, EFM= extracto de pulpa fresca por microondas y EDM= extracto de pulpa deshidratada por microondas. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de color de microcápsulas frescas.

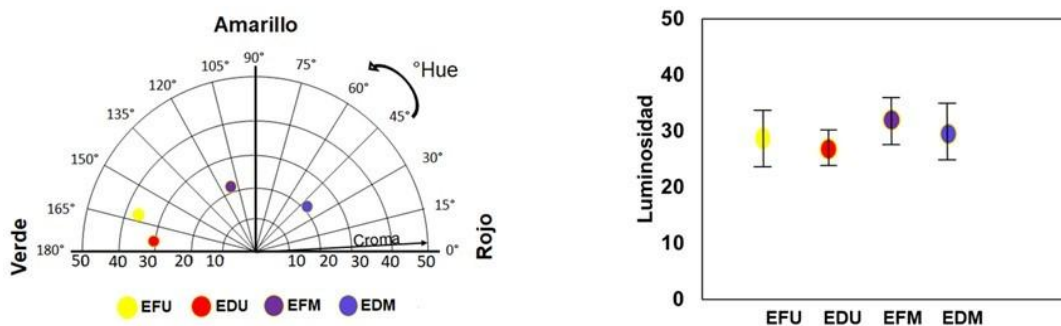


Figura 2. Distribución de Luminosidad, °Hue y Croma de microcápsulas liofilizadas, obtenidas de EFU= extracto de pulpa fresca por ultrasonido, EDU= extracto de pulpa deshidratada por ultrasonido, EFM= extracto de pulpa fresca por microondas y EDM= extracto de pulpa deshidratada por microondas. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de color de microcápsulas liofilizadas.

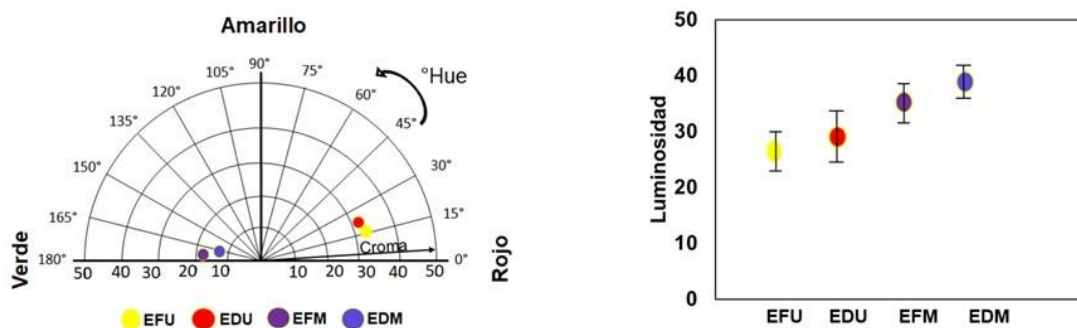


Figura 3. Distribución de Luminosidad, °Hue y Croma de microcápsulas rehidratadas, obtenidas de EFU= extracto de pulpa fresca por ultrasonido, EDU= extracto de pulpa deshidratada por ultrasonido, EFM= extracto de pulpa fresca por microondas y EDM= extracto de pulpa deshidratada por microondas. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de color de microcápsulas rehidratadas.

Contenido fenólico y actividad antioxidante

El contenido fenólico en las microcápsulas de UAE fue de 0.79 ± 0.22 mg GAE g^{-1} dw, mientras que las obtenidas por MAE fue de 1.23 ± 0.35 mg GAE g^{-1} dw. Respecto a la actividad antioxidante, las microcápsulas de UAE tuvieron 5.47 ± 0.29 mg TE g^{-1} dw y 6.23 ± 0.74 mg TE g^{-1} dw en MAE. La actividad antioxidante de los compuestos fenólicos se ve reflejada al estabilizar radicales libres y su grado de actividad está relacionado con su número de grupos hidroxilo. El mayor contenido de fenoles y actividad antioxidante se vio en microcápsulas obtenidas por MAE, esto se puede atribuir a las condiciones en las que se llevó a cabo la extracción con una rápida generación de calor que provocó la ruptura de la matriz celular y mejoró la liberación de compuestos fenólicos (Weremfo *et al.*, 2020). Dincer & Temiz (2023) quienes evaluaron la cantidad de ácido gálico en microcápsulas liofilizadas de frutos semejantes al capulín, obtuvieron un contenido superior (8.34 mg de GAE g^{-1} dw) a lo registrado en la presente investigación, esto puede deberse principalmente a que son diferentes especies vegetales, al método de extracción de compuestos fenólicos, al agente encapsulante, pues ellos emplearon maltodextrina/ goma arábiga, y a las condiciones de liofilización de las microcápsulas.

Las evaluaciones y caracterización de las microcápsulas obtenidas, permiten dilucidar que existieron diferencias en cuanto a su apariencia, contenido fenólico y actividad antioxidante. En cuanto a la presentación, las microcápsulas no liofilizadas conservaron colores rojizos, con mayor saturación y luminosidad.

Respecto al método de extracción de los compuestos bioactivos, en este caso resultaron favorables los de extracción asistida por microondas. Los polímeros alginato de calcio - goma arábica permitieron encapsular los compuestos bioactivos, sin embargo, es importante tener en cuenta la concentración de solución a emplear, pues en este caso fue elevada, lo cual pudo posiblemente afectar la luminosidad de las microcápsulas.

Sánchez-Molina *et al.* (2018), mencionaron que el desarrollo de microencapsulados con actividad antioxidante ofrece alternativas a la industria cosmética y alimentaria para generar productos de alto valor agregado. En el sector alimentario, las microcápsulas a base de pulpa de capulín pueden ser una opción en el área de lácteos, panificación y productos nutracéuticos, pues, además de permitir prolongar la vida útil de los productos, disminuir reacciones de oxidación lipídica y actuar como conservantes naturales, existe la incorporación de antioxidantes. En el ámbito nutracéutico, las microcápsulas contribuyen a potenciar la estabilidad, biodisponibilidad y liberación controlada de ingredientes bioactivos, aumentando su eficacia fisiológica. En la industria cosmética, posibilitan la formulación de productos para el cuidado de la piel o maquillajes enriquecidos con antioxidantes.

Conclusiones

El proceso de microencapsulación mediante alginato de calcio y goma arábica demostró ser una estrategia tecnológica eficaz para la preservación de compuestos bioactivos. La caracterización fisicoquímica de las microcápsulas evidenció la presencia de compuestos fenólicos y actividad antioxidante, destacando las formuladas con extractos obtenidos mediante extracción asistida por microondas. Desde el punto de vista morfológico las microcápsulas frescas presentaron formas más definidas, texturas lisas, colores más agradables y saturados. Tras el proceso de liofilización y rehidratación, aquellas microcápsulas que lograron recuperar de manera más eficiente su coloración original fueron las elaboradas con extractos obtenidos por ultrasonido, lo que sugiere una interacción más favorable entre la matriz encapsulante y los compuestos bioactivos durante el proceso de liofilización, así como en su reconstitución.

La morfología esférica y lisa observada en algunas microcápsulas, le confieren propiedades tecnológicas relevantes como mayor estabilidad, baja permeabilidad, liberación controlada de compuestos activos y adecuada fluidez, características que son óptimas para su aplicación en el desarrollo de fármacos de liberación prolongada, cosméticos de acción sostenida, productos alimentarios funcionales y diversos aditivos industriales. En contraste, las microcápsulas con superficies rugosas y porosas favorecen una liberación más rápida de los compuestos y presentan mayor capacidad de adherencia, cualidades que pueden ser aprovechadas en formulaciones farmacéuticas de liberación inmediata, cosméticos para el cuidado de la piel y recubrimientos funcionales.

Finalmente, se recomienda realizar estudios complementarios orientados a identificar los compuestos bioactivos presentes en la pulpa de capulín, así como evaluar el desempeño de las microcápsulas en los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico, con el fin de validar su implementación industrial.

Contribución de los autores

V.G.D.A., T.M.A., S.B.M., B.E.A.J., T.M.G.A., organización y desarrollo de la investigación; V.G.D.A., T.M.A., S.B.M., B.E.A.J., T.M.G.A., redacción, revisión y edición del manuscrito. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso, Estado de México, y al de Ciudad Valles, San Luis Potosí, así como al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para la realización de la presente investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Ali, M. A., Haque, A. R., Hossain, M. A., & Hasan, S. M. K. (2025). Effect of freeze drying on selective bioactive compounds and physicochemical characteristics of papaya puree. *Heliyon*, 11, e43626. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43626>
- Alu'datt, M. H., Alrosan, M., Gammoh, S., Tranchant, C. C., Alhamad, M. N., Rababah, T., Zghoul, R., Alzoubi, H., Ghatasheh, S., Ghozlan, K. & Tan, T. C. (2022). Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. *Food Bioscience*, 50(101971). <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101971>
- Assis, M., Gonçalves, M. O., de Foggi, C. C., Burck, M., dos Passos Ramos, S., Libero, L. O., & Braga, A. R. C. (2023). Applications of (Nano) encapsulated natural products by physical and chemical methods. In Cruz, J.N. Drug Discovery and Design Using Natural Products. (pp. 323-374). Ed. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35205-8_11
- Borrás, E. A. J., Reyes, V. E., Villanueva, R. S. J., & Moreno, V. L. (2021). Effect of Ultrasound-Assisted Extraction Parameters on Total Polyphenols and Its Antioxidant Activity from Mango Residues (*Mangifera indica* L. var. *Manillala*). *Separations*, 8(7), 94. <https://doi.org/10.3390/separations8070094>
- Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., & Pótorak, A. (2024). Microencapsulation of Polyphenols and Their Application in Food Technology. *Applied Sciences*, 14(24), 11954. <https://doi.org/10.3390/app142411954>
- Carrillo-Navas, H., González-Rodea, D. A., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J.F., Román-Guerrero, A., & Pérez-Alonso, C. (2011). Storage stability and physicochemical properties of passion fruit juice microcapsules by spray-drying. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 421-430.
- Calero, H. J. A., Sánchez, Y. F., Tórrez, B. R. J., Hernann, E., & López, K. (2008). Elaboración y Caracterización de microcápsulas gastrorresistentes de Diclofenac obtenidas por Gelificación Iónica. *Universitas (León)*, 2(1), 27–30. <https://doi.org/10.5377/universitas.v2i1.1640>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>

- Corona, J. E., Martínez, N. N., Ruiz, E. H., & Carranza, C. J. (2016). Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de semillas de chia (*Salvia hispanica* L.) y su actividad antioxidante. *Agrociencia*, 50(4), 403-412.
- Delazar, A., Nahar, L., Hamedeyazdan, S., & Sarker, S. D. (2012). Microwave-assisted extraction in natural products isolation. En Sarker, S.D. & Nahar, L. Natural products isolation (pp. 89-115). Ed. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-624-1_5
- Desai, M., Parikh, J., & Parikh, P. A. (2010). Extraction of Natural Products Using Microwaves as a Heat Source. *Separation & Purification Reviews*, 39(1), 1-32. <https://doi.org/10.1080/15422111003662320>
- Di, Z., Ngouana, M. A. I., Suleiman, A. H., Marcillinus, Z., Fopa, K. R. E., Haroon, E. T., Guicai, W., Chengtao, W., & Xiaobo, Z. (2022). Recent trends in the micro-encapsulation of plant-derived compounds and their specific application in meat as antioxidants and antimicrobials. *Meat Science*, 191, 108842. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108842>
- Dincer, E. İ., & Temiz, H. (2023). Investigation of physicochemical, microstructure and antioxidant properties of firethorn (*Pyracantha coccinea* var. *lalandi*) microcapsules produced by spray-dried and freeze-dried methods. *South African Journal of Botany*, 155, 340-354. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.02.024>
- Enascuta, C. E., Sirbu, E. E., Pasarin, D., Ghizdareanu, A. I., Senin, R., Hosu, I. S., Gavrilă, A. M., Burdusel, B. A. M., & Lavric, V. (2025). Enhancement of Microencapsulation of Rapeseed Oil Bioactive Compounds in Alginate Through Sonication. *Foods*, 14(10), 1692. <https://doi.org/10.3390/foods14101692>
- Esclapez, M. D., García, P. J. V., Mulet, A., & Cárcel, J. A. (2011). Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Products. *Food Engineering Reviews*, 3, 108-120. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9036-6>
- Gallardo, R. C. T., Lu, A., Treviño, G. M. Z., García, M. E., Amaya, G. C., Aguilera, C., & Báez, G. J. G. (2021). Valorization of Almond (*Prunus serotina*) by Obtaining Bioactive Compounds. *Frontiers in Nutrition*, 8, 663953. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.663953>
- Gómez, V. H. D. de J. (2018). Microencapsulación por secado por aspersión y evaluación de estabilidad en almacén de compuestos fenólicos extraídos de frutos de *Morus nigra* L. [Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara, Biomédica]. <https://hdl.handle.net/20.500.12104/81801>
- Guzmán, F. A., Segura, L. S. D., & Almaguer, V. G. (2020). El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611866>
- Hamamouche, K., Elhadji, Z., Khattabi, L., Zahnit, W., Djemoui, B., Kharoubi, O., Boussebaa, W., Bouderballa, M., EL Moustapha Kallouche, M., Attia, S. M., Ahmad, S. F., Atanassova, M., & Messaoudi, M. (2024). Impact of Ultrasound- and Microwave-Assisted Extraction on Bioactive Compounds and Biological Activities of *Jania rubens* and *Sargassum muticum*. *Marine Drugs*, 22(12), 530. <https://doi.org/10.3390/md22120530>
- Jiménez, M., Castillo, I., Azuara, E., & Beristain, C. I. (2011). Antioxidant and antimicrobial activity of capulín (*Prunus serotina* subsp *capuli*) extracts. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(1), 29-37.
- Lancaster, J. E., Lister, C. E., Reay, P. F., & Triggs, C. M. (1997). Influence of Pigment Composition on Skin Color in a Wide Range of Fruit and Vegetables. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122(4), 594-598. <https://doi.org/10.21273/JASHS.122.4.594>
- Liau, K. Y., Liu, Y., & Zhao, Y. (2025). Comparative Evaluation of Palm-Based Carotene Microcapsules Produced via Spray Drying and Supercritical Fluid Drying and Their Application as a Non-Dairy Creamer. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 9912- 9926. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-04008-z>
- López, H. E. F., Gómez, O. Y., & Santiago, M. H. (2024). Conocimiento etnobotánico asociado al árbol de capulín (*Prunus serótina* Ehrh.) en comunidades mazahua de Jocotitlán estado de México, México. *Revista Etnobiología*, 22(1), 19-35. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/566/527>
- Luna-Vázquez, F. J., Ibarra-Alvarado, C., Rojas-Molina, A., Rojas-Molina, J. I., Yahia, E. M., Rivera-Pastrana, D. M., Rojas-Molina, A., & Zavala-Sánchez, Á. M. (2013). Nutraceutical value of black cherry *Prunus serotina* Ehrh. Fruits: antioxidant and antihypertensive properties. *Molecules*, 18(12), 14597-14612. <https://doi.org/10.3390/molecules181214597>

- Munin, A., & Edwards-Lévy, L. F. (2011). Encapsulation of Natural Polyphenolic Compounds; a review. *Pharmaceutics*, 3 (4), 793-829. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics3040793>
- Norma Oficial Mexicana. Bienes y servicios. (1994). Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. método por arena o gasa (NOM-116-SSA1-1994). <https://salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/116ssa14.html>
- Norma Mexicana. (2019). Alimentos para animales determinación de cenizas en alimentos terminados e ingredientes para consumo animal- método de prueba (NMX-Y-362-SCFI-2019). <https://es.scribd.com/document/865244848/NMX-Y-362-SCF-2019-Determinacion-de-Cenizas>
- Paini, M., Aliakbarian, B., Casazza, A. A., Lagazzo, A., Botter, R., & Perego, P. (2015). Microencapsulation of phenolic compounds from olive pomace using spray drying: A study of operative parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.022>
- Parra, R. A. (2010). Revisión: Microencapsulación de Alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía. Revista Facultad Nacional de Agronomía- Medellín*, 63(2), 5669-5684.
- Pinzón, R. J., & Gómez, H. J. (2020). Methods for the extraction and characterization of bioactive compounds in orange fruit waste [Thesis Bachelor's degree, Universidad de los Andes, B.SC. Chemical Engineering]. <https://hdl.handle.net/1992/49084>
- Ramos, I., Ligarda, C. A., Ramos, D. J., Moscoso, E., Choque, D., Palomino, H., Ramos, B. S., & Buleje, D. (2024). Evaluación de la Microencapsulación de compuestos bioactivos extraídos de coronta de maíz morado (*Zea mays* L.) en matrices de maltodextrina y goma de tara. In Medina, D., França, L., & De Oliveira, V.C. *Avances científicos y tecnológicos en ciencias agrícolas 4*. (pp. 74-88). Ed. Atena. <https://doi.org/10.22533/at.ed.6172402028>
- Rispo, F., De Negri Atanasio, G., Demori, I., Costa, G., Marchese, E., Perera-del-Rosario, S., Serrano-Candelas, E., Palomino-Schätzlein, M., Perata, E., Robino, F., Ferrari, P. F., Ferrando, S., Letasiova, S., Markus, J., Zanotti-Russo, M., & Grasselli, E. (2024). An extensive review on phenolic compounds and their potential estrogenic properties on skin physiology. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1305835. <https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1305835>
- Sánchez-Molina, D., Vargas-Porra, M., Ortega-Toro, R., & Piñeros-Castro, Y. (2018). Extracción y encapsulación de compuestos fenólicos provenientes de cascarilla de arroz. *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, 47(3), 410-423. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v47n3.77373>
- Singh, M. N., Hemant, K. S., Ram, M., & Shivakumar, H.G. (2010). Microencapsulation: A promising technique for controlled drug delivery. *Research in pharmaceutical science*, 5(2), 65-77. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21589795/>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2023, mayo 09). Capulín, Cierre de la producción agrícola, Acciones y Programas. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Sukanya, D., Mitra, L., Govindarajan, S., Spoorthy, N. B., & Ayesha, N. (2022). Effect of Microencapsulation by Calcium Alginate on the Anti-Oxidant Properties of *Swietenia macrophylla*. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy*, 16, 123-132.
- Trujano, F. A., & Lozano, J. M. (2020). Efecto de la gelificación iónica de alginato de sodio y gelana de alto acilo en microcápsulas adicionadas de iones calcio [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ingeniería en Alimentos]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3624332>
- Viveros-Contreras, R., Téllez-Medina, D. I., Perea-Flores, M.J., Alamilla-Beltrán, L., Cornejo-Mazón, M., Beristain-Guevara, C.I., Azuara-Nieto, E., & Gutiérrez-López, G. F. (2012). Encapsulation of ascorbic acid into calcium alginate matrices through coacervation coupled to freeze-drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12 (1), 29-39.
- Weremfo, A., Adulley, F., & Adarkwah-Yiadom, M. (2020). Simultaneous Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Avocado (*Persea americana* Mill.) Seeds Using Response Surface Methodology. *Journal of analytical methods in chemistry*, 7541927. <https://doi.org/10.1155/2020/7541927>

Zabot, G. L., Schaefer, F., Polano, L., Vinícius, M., Herrera, E., Palacin, H., Córdova, J. S., Best, I., & Olivera, L. (2022). Encapsulation of Bioactive Compounds for Food and Agricultural Applications. *Polymers*, 14(19), 4194. <https://doi.org/10.3390/polym14194194>