VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Encapsulación de carotenoides de cempasúchil en polímeros biocompatibles para su liberación controlada

Encapsulation of marigold carotenoids in biocompatible polymers for controlled release

Felipe A. Valdivia Sánchez[a], Luis A. Durán Hernández[a], Erika Rodríguez-Sevilla[a], Edgar Vázquez Núñez[a,*]

a Grupo de Investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad (NanoBioTS), LaSAE, DIQEB, DCI, Universidad de Guanajuato, Campus León, Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre, MX37150, León, Guanajuato, Mexico

ed.vazquezn@gmail.com; edgar.vazquez@ugto.mx

Resumen

Los carotenoides presentes en los pétalos de *Tagetes erecta* (cempasúchil), principalmente luteína y zeaxantina, poseen un elevado potencial como ingredientes funcionales; sin embargo, su baja estabilidad limita su aprovechamiento tecnológico. En este trabajo se obtuvieron extractos de carotenoides totales mediante extracción Soxhlet y posteriormente se encapsularon en esferas de alginato de sodio empleando gelación iónica con tripolifosfato de sodio (TPP). La caracterización espectroscópica del extracto mostró tres bandas principales de absorción alrededor de 350, 454 y 482 nm, seleccionándose 454 nm para la cuantificación de los carotenoides liberados. Las esferas presentaron un diámetro promedio de 0.281 ± 0.024 cm (n = 78), con una distribución aproximadamente normal y una baja variabilidad de tamaño. Los ensayos de liberación realizados durante 1080 min mostraron un incremento rápido de la concentración de carotenoides durante los primeros 120 min, seguido de una etapa de estabilización. Aunque las tres formulaciones presentaron un comportamiento de liberación similar, la cantidad total de carotenoides liberados aumentó conforme se incrementó la concentración inicial del extracto encapsulado (0.5, 1.5 y 2.5 mg mL^{-1}). En conjunto, los resultados demuestran que las esferas de alginato constituyen un sistema prometedor para proteger carotenoides naturales y favorecer su liberación controlada, ampliando sus posibilidades de aplicación en alimentos funcionales, nutracéuticos y formulaciones cosméticas.

Palabras clave: *Tagetes erecta*; carotenoides; alginato; encapsulación; liberación controlada.

Introducción

En México, pocas flores poseen un significado cultural tan profundo como el cempasúchil (*Tagetes erecta* L.). Sus intensos colores amarillo y anaranjado, junto con su aroma característico, la han convertido en el símbolo por excelencia del Día de Muertos, una de las tradiciones más representativas del país. Cada año, millones de flores son cultivadas para decorar altares y ofrendas, preservando una práctica ancestral que fortalece la identidad cultural de las comunidades mexicanas y constituye una importante fuente de ingresos para numerosos productores rurales.

Sin embargo, el cempasúchil posee un valor que trasciende su función ornamental. Detrás de sus llamativos pétalos existe una gran diversidad de compuestos naturales que pueden aprovecharse. Entre ellos destacan los carotenoides, moléculas de gran interés por sus propiedades biológicas y por sus aplicaciones potenciales en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y nutracéutica (Pal y Bhattacharjee, 2018; Rao y Poonia, 2024).

Los carotenoides son pigmentos naturales sintetizados por plantas, algas y algunos microorganismos. Son los responsables de los colores amarillos, anaranjados y rojizos presentes en flores, frutos y hortalizas, además de desempeñar funciones esenciales en la fotosíntesis y en la protección de las plantas frente al estrés oxidativo ocasionado por la radiación solar (Steiner et al., 2018).

Dentro de este grupo se encuentran la luteína y la zeaxantina, dos carotenoides pertenecientes a las xantofilas que abundan en los pétalos del cempasúchil. Diversos estudios han demostrado que esta especie constituye una de las fuentes naturales más importantes para la obtención de luteína, razón por la cual

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

actualmente es utilizada como materia prima para la producción de colorantes naturales y suplementos alimenticios (Oo et al., 2024; Rao y Poonia, 2024).

En el organismo humano, la luteína y la zeaxantina se acumulan principalmente en la mácula de la retina, donde actúan como un filtro natural frente a la luz azul y ayudan a disminuir el daño ocasionado por los radicales libres. Gracias a esta actividad antioxidante, diversos estudios las asocian con la protección de la salud visual y con la disminución del riesgo de enfermedades oculares relacionadas con el envejecimiento (Steiner et al., 2018). Además, su capacidad antioxidante ha despertado interés para el desarrollo de alimentos funcionales, ingredientes nutracéuticos y productos cosméticos con beneficios potenciales para la salud (Brum et al., 2017).

A pesar de sus múltiples beneficios, los carotenoides presentan una importante limitación: son compuestos muy sensibles a las condiciones del ambiente. La exposición a la luz, al oxígeno, al calor y a la humedad favorece su degradación, disminuyendo su estabilidad y reduciendo tanto su capacidad antioxidante como su intensidad de color (Steiner et al., 2018; Mantovani et al., 2022).

Otra dificultad radica en que la luteína y la zeaxantina prácticamente no se disuelven en agua. Esta baja solubilidad limita su incorporación en bebidas, alimentos acuosos y otras formulaciones, además de reducir la cantidad que puede ser absorbida por el organismo después de su consumo (Mantovani et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Para superar estas limitaciones se han desarrollado diferentes estrategias de encapsulación. En términos sencillos, encapsular significa rodear o atrapar un compuesto dentro de una matriz protectora capaz de aislarlo parcialmente del ambiente. Esta cubierta actúa como un escudo que disminuye la degradación del compuesto, mejora su estabilidad durante el almacenamiento y puede controlar la velocidad con la que es liberado hacia el medio que lo rodea (Brum et al., 2017; Steiner et al., 2018).

Diversas investigaciones han empleado materiales como maltodextrina, goma arábiga, proteínas, almidones, pectinas y otros biopolímeros para encapsular carotenoides provenientes del cempasúchil y de otras fuentes vegetales, obteniendo sistemas con mayor estabilidad y mejor dispersión en medios acuosos (Nalawade y Gajjar, 2016; Oo et al., 2024; Thakur et al., 2026).

Entre estos materiales, el alginato ocupa un lugar destacado. Se trata de un biopolímero natural constituido por copolímeros lineales de ácido β-D-manurónico (M) y ácido α-L-gulurónico (G), extraído principalmente de algas pardas del género *Laminaria*, *Macrocystis* y *Ascophyllum*. Su biodegradabilidad, biocompatibilidad, baja toxicidad y capacidad para formar hidrogeles y microesferas mediante gelificación iónica en presencia de cationes divalentes, como Ca^{2+}, lo convierten en uno de los materiales más utilizados para el desarrollo de sistemas de encapsulación y liberación controlada de compuestos bioactivos (Rodríguez-Amaya et al., 2023). Además de proteger a los carotenoides frente a la degradación causada por la luz, el oxígeno y la temperatura, la matriz de alginato permite modular su difusión hacia el medio circundante, favoreciendo una liberación sostenida y prolongando la disponibilidad del compuesto bioactivo.

En este contexto, el cempasúchil representa un excelente ejemplo de cómo un recurso profundamente ligado a la cultura mexicana puede adquirir un nuevo valor mediante la investigación científica. Una flor utilizada tradicionalmente durante las celebraciones del Día de Muertos también puede convertirse en una fuente sostenible de biomoléculas con aplicaciones tecnológicas de alto valor agregado, contribuyendo al aprovechamiento integral de los recursos vegetales y al desarrollo de una bioeconomía basada en productos naturales (Pal y Bhattacharjee, 2018; Rao y Poonia, 2024).

Con esta perspectiva, en el presente trabajo se extrajeron carotenoides totales de flores de cempasúchil y se encapsularon utilizando alginato como matriz biopolimérica. Posteriormente, se evaluó la liberación de estos compuestos en un medio acuoso con el propósito de explorar el potencial del sistema para proteger y liberar de manera controlada la luteína y la zeaxantina. Este tipo de investigaciones demuestra cómo la combinación entre biodiversidad, materiales biocompatibles y tecnologías de encapsulación puede transformar una especie emblemática de la cultura mexicana en una fuente de ingredientes funcionales con aplicaciones futuras en alimentos, nutracéuticos y productos para la salud.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Materiales y métodos

Reactivos químicos

Para el desarrollo experimental se empleó alginato de grado analítico (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.), utilizado como material encapsulante para la formación de las esferas mediante gelificación iónica con cloruro de calcio (Industrial Kem, México). Para la extracción de los carotenoides presentes en los pétalos de *Tagetes erecta* se empleó acetona grado reactivo (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos). Asimismo, se utilizó agua destilada (Industrial Kem, México) para la elaboración de soluciones y el lavado de las esferas. Todos los reactivos fueron utilizados sin purificación adicional.

Obtención y acondicionamiento de pétalos de *Tagetes erecta*

Las flores de *Tagetes erecta* L. fueron adquiridas durante noviembre de 2025 en un establecimiento comercial local. Los pétalos fueron separados manualmente del receptáculo floral y lavados con agua para eliminar polvo, partículas y otros residuos superficiales. Posteriormente, el exceso de humedad fue retirado mediante secado superficial con papel absorbente.

Los pétalos acondicionados fueron almacenados a −20 °C hasta su utilización. El día de la extracción, el material vegetal fue descongelado a temperatura ambiente y utilizado inmediatamente, con el propósito de reducir la degradación de los carotenoides por exposición prolongada a la luz, al oxígeno y a temperaturas elevadas.

Obtención del extracto de carotenoides totales

La obtención del extracto de carotenoides totales se realizó mediante extracción continua en un sistema Soxhlet. Para cada extracción se emplearon 10 g de pétalos previamente acondicionados y 100 mL de acetona como disolvente.

El material vegetal se colocó en un cartucho de extracción y se introdujo en la cámara del equipo Soxhlet. La acetona contenida en un matraz de fondo redondo fue calentado hasta ebullición controlada. Los vapores generados ascendieron hacia el condensador y retornaron en estado líquido sobre la muestra vegetal, favoreciendo la solubilización de los pigmentos lipofílicos. Al alcanzar el nivel del sifón, la solución fue transferida nuevamente al matraz de calentamiento y se inició un nuevo ciclo de extracción.

El procedimiento se mantuvo hasta completar cinco ciclos completos de extracción. Al finalizar, el extracto fue concentrado mediante evaporación a presión reducida en un evaporador rotatorio hasta alcanzar el volumen mínimo posible. El extracto concentrado fue transferido a un frasco ámbar y almacenado a 4 °C, protegido de la luz, hasta su utilización en el proceso de encapsulación.

Caracterización óptica del extracto de carotenoides totales

El extracto de carotenoides totales obtenido fue caracterizado mediante técnicas espectroscópicas con el propósito de determinar sus propiedades ópticas y establecer las condiciones experimentales empleadas durante los ensayos posteriores de liberación.

La caracterización por absorción se realizó mediante espectrofotometría UV-Visible utilizando el extracto disuelto en acetona como solvente. Los espectros de absorción fueron registrados en un intervalo de longitud de onda comprendido entre 300 y 800 nm, utilizando una celda de cuarzo de 1 cm de trayectoria óptica y acetona como blanco. A partir del espectro obtenido se seleccionó la longitud de onda de 445 nm para la cuantificación espectrofotométrica de los carotenoides totales liberados durante los ensayos de difusión, debido a su proximidad con una de las bandas principales de absorción del extracto.

Con el fin de complementar la caracterización fotofísica del extracto, también se obtuvieron espectros de fluorescencia mediante un espectrofluorómetro. Los espectros de emisión fueron registrados en un intervalo aproximado de 450 a 900 nm, manteniendo constante la longitud de onda de excitación seleccionada para el extracto. De manera complementaria, los espectros de excitación fueron obtenidos en un intervalo aproximado de 390 a 620 nm, utilizando como referencia la longitud de onda correspondiente al máximo de emisión observado para el extracto.

Todos los análisis espectroscópicos se realizaron por triplicado y los espectros obtenidos fueron utilizados para verificar el comportamiento óptico del extracto de carotenoides totales previo a su encapsulación y para seleccionar las condiciones analíticas empleadas durante la cuantificación del proceso de liberación.

Manufactura de esferas de alginato

Las esferas fueron obtenidas mediante gelación iónica. Este método se basa en la interacción electrostática entre los grupos amino protonados del alginato y los grupos fosfato con carga negativa del tripolifosfato de sodio, lo que conduce a la formación de una red polimérica tridimensional capaz de retener el extracto de carotenoides totales.

Para la preparación de la solución encapsulante se elaboró una solución de alginato al 0.5 % (m/v), utilizando agua destilada como medio de disolución. El biopolímero fue incorporado gradualmente bajo agitación magnética continua hasta obtener una solución homogénea y libre de agregados visibles. Posteriormente, la solución se mantuvo en reposo para favorecer la eliminación de las burbujas de aire generadas durante la agitación.

El extracto concentrado de carotenoides totales de *Tagetes erecta* se incorporó a la solución de alginato bajo agitación continua hasta obtener una dispersión homogénea. Se prepararon tres formulaciones con cargas iniciales de extracto de 0.5, 1.5 y 2.5 mg mL^{-1}, utilizadas posteriormente para la obtención de las esferas de alginato.

Las esferas permanecieron en la solución de TPP durante 30 min para completar el proceso de reticulación. Posteriormente, fueron recuperadas mediante filtración y lavadas con agua destilada para eliminar el exceso de agente reticulante y el extracto no retenido en la superficie. Finalmente, las esferas fueron almacenadas a 4 °C, protegidas de la luz, hasta su utilización en los ensayos de liberación.

Caracterización morfométrica de esferas de alginato

Se manufacturaron esferas de alginato, de las cuales se seleccionaron aleatoriamente 78 unidades para su caracterización morfométrica. El diámetro de cada esfera se determinó mediante el análisis digital de una imagen empleando un código desarrollado en Python, previa calibración espacial con una referencia de longitud conocida. Con los diámetros obtenidos se calcularon la media, la desviación estándar y el intervalo de tamaños. Asimismo, se construyó un histograma de distribución de frecuencias y se ajustó una curva de distribución normal utilizando el software R y los paquetes ggplot2 y dplyr.

Ensayo de liberación de carotenoide totales

Con el propósito de evaluar el efecto de la cantidad inicial de extracto sobre el comportamiento de liberación, se prepararon tres formulaciones de esferas de alginato que diferían únicamente en la concentración inicial del extracto de carotenoides totales incorporado a la matriz polimérica (0.5, 1.5 y 2.5 mg mL^{-1}).

Los ensayos de liberación se realizaron utilizando una mezcla aquosa de agua destilada:acetona (50%v/v) como medio receptor. Para cada formulación, las esferas fueron colocadas en recipientes (1 g) que contenían un volumen de 10 ml del medio de liberación y se mantuvieron bajo condiciones constantes de temperatura y agitación de 120 rpm durante todo el experimento.

La liberación del extracto de carotenoides totales fue monitoreada durante 1080 min (18 h). Se realizaron determinaciones a los 0, 15, 30, 60, 120 y 1080 min, retirando en cada intervalo una alícuota del medio de liberación para la cuantificación de los carotenoides difundidos desde la matriz polimérica.

La concentración de carotenoides totales liberados se determinó mediante espectrofotometría UV-Visible empleando un espectrofotómetro de doble haz. Las mediciones se realizaron a 350 nm, longitud de onda correspondiente al máximo de absorción del extracto de carotenoides totales de *Tagetes erecta*, previamente determinada durante la caracterización óptica del extracto. La concentración de carotenoides liberados se calculó a partir de una curva de calibración elaborada con el extracto de carotenoides totales y los resultados se expresaron como mg L^{-1}.

Las curvas de liberación obtenidas permitieron comparar el comportamiento de las tres formulaciones encapsuladas y evaluar la influencia de la carga inicial del extracto sobre la cinética de difusión de los carotenoides desde la matriz de alginato hacia el medio acuoso.

Análisis estadístico

Los experimentos de liberación se realizaron por triplicado para cada concentración inicial de carotenoides y los resultados se expresaron como media ± desviación estándar. Se calcularon estadísticas descriptivas para cada tiempo de muestreo.

Con el fin de evaluar simultáneamente el efecto de la concentración inicial, el tiempo de liberación y la interacción entre ambos factores sobre la concentración de carotenoides liberados, se ajustó un modelo lineal mixto (LMM**)**. La concentración inicial y el tiempo se consideraron como efectos fijos, mientras que la réplica experimental se incorporó como efecto aleatorio para considerar la dependencia entre las mediciones repetidas realizadas sobre la misma unidad experimental. El tiempo inicial (0 min) se excluyó del análisis inferencial debido a que todas las observaciones presentaron un valor de cero, por lo que no existía variabilidad experimental.

La significancia de los efectos fijos se evaluó mediante un análisis de varianza tipo III empleando la aproximación de Kenward–Roger para los grados de libertad. Cuando se detectaron diferencias significativas, se realizaron comparaciones múltiples entre medias marginales estimadas mediante la prueba de Tukey. En todos los casos se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Los análisis estadísticos se realizaron en el software R versión 4.5.1 (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria), utilizando los paquetes lme4, lmerTest, emmeans y multcomp.

Resultados y discusión

Caracterización morfológica de las esferas de alginato

Las esferas de alginato obtenidas mediante gelación iónica constituyen el sistema de encapsulación empleado para proteger el extracto de carotenoides y controlar su liberación. Una de las propiedades físicas más relevantes de este tipo de materiales es el tamaño de partícula, ya que puede influir en la capacidad de encapsulación y en la uniformidad del proceso de liberación.

La distribución del diámetro de las esferas se presenta en la Figura 1. Los diámetros oscilaron entre 0.222 y 0.372 cm, con un diámetro promedio de 0.281 ± 0.024 cm (n = 78). El histograma mostró una distribución aproximadamente normal, concentrándose la mayor parte de las partículas entre 0.26 y 0.30 cm, mientras que sólo unas pocas esferas presentaron diámetros mayores o menores que este intervalo.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

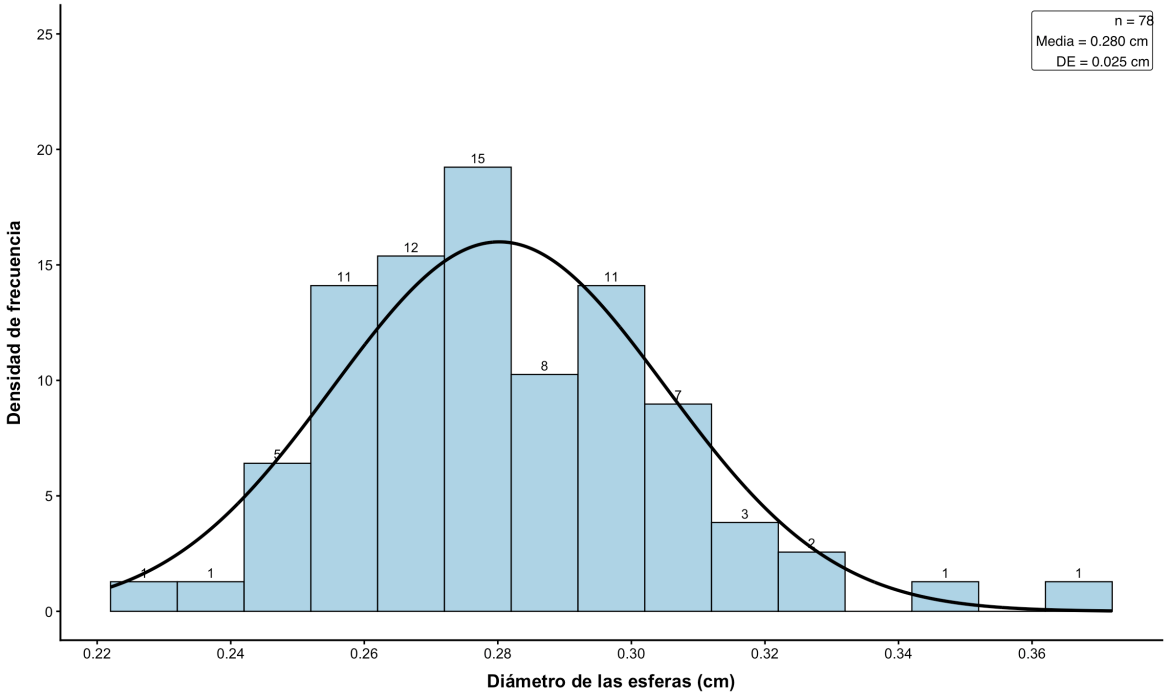


Figura 1. Distribución del diámetro de las esferas de alginato obtenidas mediante gelación iónica utilizando tripolifosfato de sodio como agente reticulante.

La distribución observada indica que el método de gelación iónica produjo partículas con una variabilidad relativamente baja en tamaño, lo que sugiere una buena reproducibilidad del procedimiento de preparación. Estudios previos han señalado que una distribución estrecha del tamaño de las partículas favorece una encapsulación más homogénea y una respuesta más consistente durante los procesos de liberación de compuestos bioactivos (Steiner et al., 2018; Thakur et al., 2026; Mathew et al., 2025). Estos resultados confirman que las esferas obtenidas presentan características físicas adecuadas para su evaluación como sistemas de liberación controlada de carotenoides.

Caracterización óptica del extracto de carotenoides totales de *T. erecta*

Los carotenoides son los pigmentos responsables de la intensa coloración amarilla y anaranjada característica de los pétalos de cempasúchil. Además de aportar color, estos compuestos poseen actividad antioxidante y han despertado un creciente interés por sus posibles beneficios para la salud, razón por la cual es importante confirmar su presencia en el extracto obtenido antes de incorporarlo a las esferas de alginato.

Para ello se realizó una caracterización óptica mediante espectroscopía UV-Visible y fluorescencia, técnicas ampliamente empleadas para estudiar extractos vegetales debido a que permiten identificar el comportamiento característico de los pigmentos presentes.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

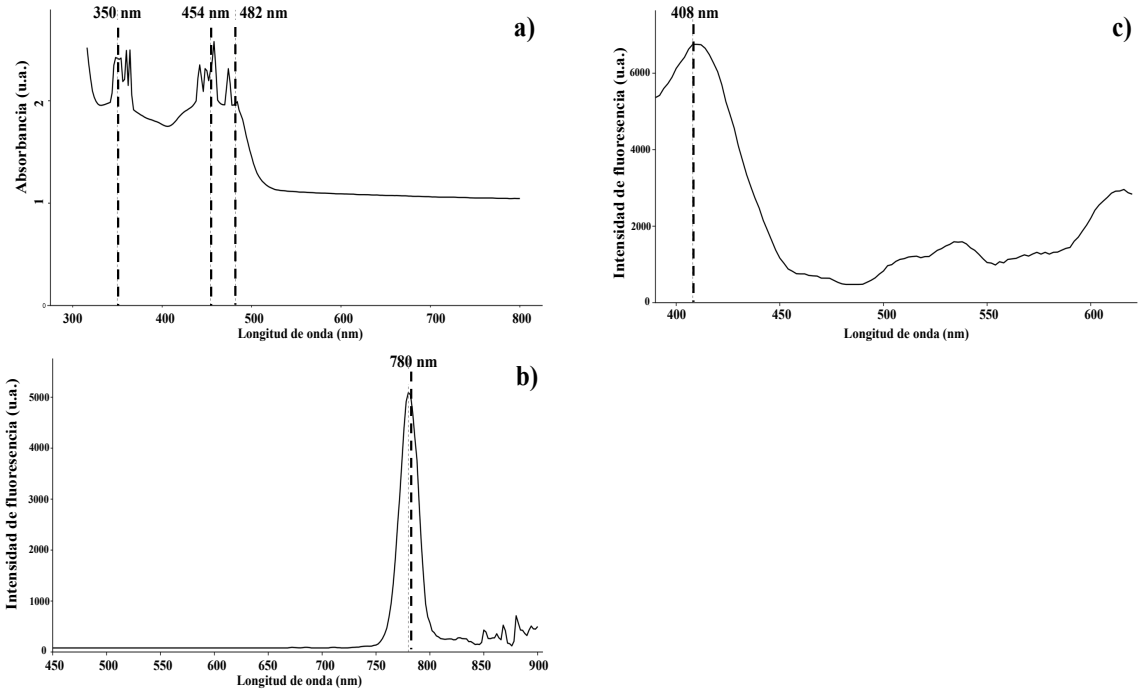


Figura 2. Caracterización óptica del extracto de carotenoides totales obtenido a partir de pétalos de T. erecta: (a) espectro de absorción UV-Visible; (b) espectro de emisión; y (c) espectro de excitación.

El espectro de absorción presentó tres bandas principales alrededor de 350, 454 y 482 nm, siendo la señal ubicada en 454 nm la de mayor intensidad. Este comportamiento coincide con el descrito para extractos de cempasúchil ricos en carotenoides y confirma que el procedimiento de extracción permitió recuperar los pigmentos característicos de esta especie (Pal y Bhattacharjee, 2018; Oo et al., 2024). Debido a ello, esta longitud de onda fue seleccionada para cuantificar los carotenoides durante los experimentos de liberación.

Los espectros de emisión y excitación complementaron esta caracterización y mostraron un comportamiento similar al reportado para otros extractos vegetales ricos en carotenoides (Steiner et al., 2018). En conjunto, los resultados indican que el extracto conserva las propiedades ópticas esperadas y que puede ser monitoreado de manera confiable durante las diferentes etapas del proceso experimental.

Más allá de confirmar la presencia de los pigmentos, esta caracterización proporciona una base para evaluar posteriormente la estabilidad del extracto una vez encapsulado. Diversos estudios han señalado que la encapsulación constituye una estrategia eficaz para proteger los carotenoides frente a factores ambientales como la luz, el oxígeno y la temperatura, prolongando así su estabilidad y ampliando sus posibilidades de aplicación en alimentos y formulaciones nutracéuticas (Nalawade y Gajjar, 2016; Mantovani et al., 2022).

Liberación del extracto de carotenoides totales

Uno de los principales objetivos de encapsular compuestos bioactivos consiste en evitar que sean liberados de manera inmediata al entrar en contacto con el medio, favoreciendo una disponibilidad más gradual. En este trabajo se evaluó la liberación del extracto de carotenoides durante 1080 minutos (18 horas) utilizando una mezcla de agua destilada:acetona como medio de estudio y tres formulaciones con diferentes concentraciones iniciales del extracto (0.5, 1.5 y 2.5 mg mL^{-1}).

Los perfiles de liberación obtenidos se presentan en la Figura 3.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

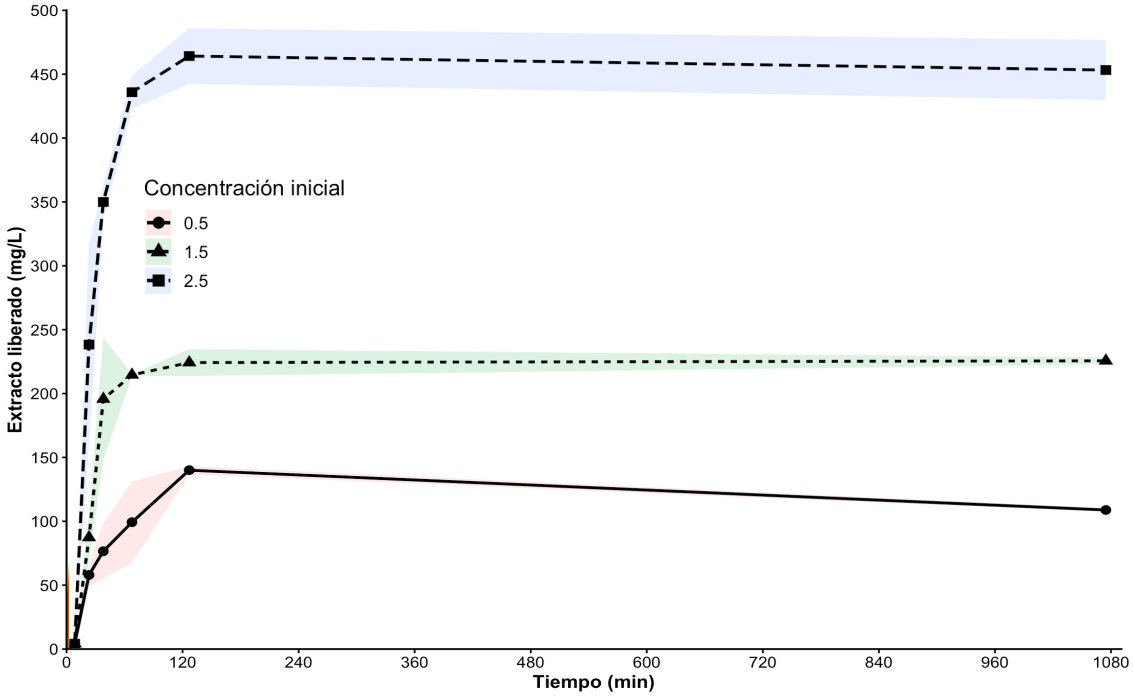


Figura 3. Perfiles de liberación del extracto de carotenoides totales encapsulado en esferas de alginato con concentraciones iniciales de 0.5, 1.5 y 2.5 mg mL^{-1}. Las determinaciones experimentales se realizaron a los 0, 15, 30, 60, 120 y 1080 min.
** Las líneas representan los valores promedio de extracto liberado y las bandas sombreadas (ribbons) corresponden a la desviación estándar (DE) alrededor de cada punto experimental.*

Las tres formulaciones mostraron un comportamiento semejante. En todos los casos, la mayor parte del extracto fue liberada durante los primeros minutos del ensayo y posteriormente la concentración permaneció prácticamente constante hasta completar el tiempo de evaluación. Este tipo de comportamiento también ha sido observado en otros sistemas de encapsulación desarrollados con alginato y diferentes biopolímeros, donde una parte del compuesto bioactivo se encuentra disponible inmediatamente mientras otra permanece protegida dentro de la matriz encapsulante (Nalawade y Gajjar, 2016; Zhang et al., 2024).

Aunque el patrón general fue similar para las tres formulaciones, la cantidad total de carotenoides liberados aumentó conforme se incrementó la concentración inicial del extracto utilizado durante la encapsulación. En otras palabras, las esferas preparadas con mayor cantidad de carotenoides también liberaron una mayor cantidad de estos compuestos al medio acuoso. Resultados comparables han sido reportados recientemente para extractos de *T. erecta*, donde el incremento de la carga inicial permitió aumentar la cantidad de carotenoides disponibles sin modificar el comportamiento general del sistema (Oo et al., 2024; Thakur et al., 2026).

Desde una perspectiva práctica, estos resultados muestran que las esferas de alginato no sólo actúan como un recipiente para almacenar el extracto, sino también como un sistema capaz de proteger los carotenoides y favorecer una liberación progresiva. Esta característica resulta especialmente atractiva para el desarrollo de ingredientes funcionales, ya que permite reducir las pérdidas asociadas a la degradación de estos pigmentos y facilita su incorporación en productos alimentarios, suplementos nutricionales y otras formulaciones de interés (Mantovani et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Los resultados demuestran que la encapsulación mediante alginato representa una estrategia prometedora para incrementar el aprovechamiento de los carotenoides presentes en el cempasúchil. Además de contribuir a preservar estos compuestos naturales, este tipo de sistemas abre nuevas oportunidades para transformar una especie ampliamente conocida por su valor ornamental y cultural en una fuente de ingredientes con potencial aplicación en el sector alimentario y nutracéutico, favoreciendo así el desarrollo de alternativas sostenibles de mayor valor agregado.

El análisis mediante un modelo lineal mixto evidenció que la liberación de carotenoides estuvo influenciada significativamente por la concentración inicial, el tiempo de liberación y la interacción entre ambos factores (Tabla 1). El efecto de la concentración inicial fue el de mayor magnitud estadística ($F = 394.93$; $p < 0.001$), seguido por el tiempo de liberación ($F = 41.79$; $p < 0.001$). Asimismo, la interacción concentración × tiempo resultó significativa ($F = 5.12$; $p < 0.001$), indicando que el efecto de la concentración inicial sobre la liberación de carotenoides varió a lo largo del periodo experimental.

Debido a la interacción significativa, se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey para cada tiempo de evaluación. A los 15 min no se detectaron diferencias significativas entre las formulaciones con 0.5 y 1.5 mg L^{-1} ($p = 0.4172$); sin embargo, ambas liberaron cantidades significativamente menores de carotenoides que la formulación con 2.5 mg L^{-1} ($p < 0.0001$). A partir de los 30 min y hasta las 1080 min, las tres concentraciones iniciales difirieron significativamente entre sí ($p < 0.01$), observándose un incremento progresivo en la liberación de carotenoides conforme aumentó la carga inicial del extracto.

Tabla 1. *Análisis de varianza del modelo lineal mixto (LMM) para evaluar el efecto de la concentración inicial y el tiempo sobre la liberación de carotenoides.*

Fuente de variación	gl (Num, Den)	SC	CM	F	*p*
Concentración inicial	2, 6	619935	309967	394.93	<0.001***
Tiempo	4, 24	131184	32796	41.79	<0.001***
Concentración × Tiempo	8, 24	32164	4020	5.12	<0.001***

SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; gl: grados de libertad.

Los resultados del LMM demuestran que la concentración inicial de carotenoides fue el principal factor que determinó la liberación desde las esferas de alginato, como lo evidencia el elevado valor de F obtenido para este factor. Este comportamiento indica que la cantidad de carotenoides incorporada durante la encapsulación ejerció una influencia mayor sobre la liberación que el propio transcurso del tiempo, lo que sugiere que la disponibilidad inicial del compuesto bioactivo condicionó la magnitud de la difusión hacia el medio externo.

La interacción significativa entre concentración y tiempo confirma que la cinética de liberación estuvo controlada simultáneamente por ambos factores. Durante los primeros 15 min, la ausencia de diferencias entre las formulaciones con 0.5 y 1.5 mg L^{-1} sugiere que la etapa inicial estuvo dominada por la liberación rápida de carotenoides adsorbidos o localizados en las regiones superficiales de la matriz, fenómeno comúnmente asociado al denominado *burst release*. En contraste, la formulación con 2.5 mg L^{-1} presentó desde esta etapa una liberación significativamente mayor, indicando que una mayor carga inicial incrementó la cantidad de carotenoides disponibles para su difusión inmediata.

A partir de los 30 min, las diferencias estadísticas entre las tres formulaciones se mantuvieron hasta el final del ensayo, lo que indica que la concentración inicial continuó influyendo sobre la velocidad y magnitud de la liberación. Este comportamiento puede atribuirse al establecimiento de gradientes de concentración más pronunciados dentro de las esferas con mayor contenido de carotenoides, favoreciendo el transporte difusivo hacia el medio de liberación. En conjunto, estos resultados son consistentes con un mecanismo de liberación predominantemente controlado por difusión, en el cual el incremento de la carga inicial aumenta la fuerza impulsora para la transferencia de masa sin modificar el mecanismo fundamental de liberación del sistema.

Perspectivas

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Los resultados obtenidos muestran que la encapsulación de carotenoides mediante esferas de alginato constituye una estrategia prometedora para incrementar la estabilidad y el aprovechamiento de compuestos bioactivos provenientes del cempasúchil. No obstante, aún es necesario profundizar en diversos aspectos para favorecer su transferencia hacia aplicaciones reales.

Las investigaciones futuras deberán centrarse en evaluar la estabilidad de los carotenoides encapsulados durante el almacenamiento bajo diferentes condiciones de luz, temperatura, oxígeno y humedad, así como en estudiar su comportamiento en condiciones gastrointestinales simuladas para estimar su liberación y biodisponibilidad. Asimismo, será importante optimizar variables de formulación, como la concentración de alginato, el grado de reticulación con tripolifosfato de sodio (TPP) y la cantidad de extracto incorporado, con el fin de mejorar la eficiencia de encapsulación y controlar la velocidad de liberación. De igual manera, será necesario verificar que el proceso de encapsulación preserve la capacidad antioxidante de los carotenoides y desarrollar estrategias de escalamiento que permitan producir las esferas de manera continua sin afectar sus propiedades.

Más allá de estos desafíos tecnológicos, el sistema desarrollado presenta un amplio potencial de aplicación en diferentes sectores industriales. Como se muestra en la Figura 4, las esferas de alginato cargadas con carotenoides podrían incorporarse en alimentos fermentados fortificados, bebidas funcionales, suplementos alimenticios, compuestos nutracéuticos encapsulados, alimentos y golosinas funcionales, empaques activos y formulaciones cosméticas. Estas aplicaciones aprovechan la capacidad del sistema para proteger compuestos sensibles y facilitar su incorporación en distintas matrices, ampliando las posibilidades de utilización de la luteína y la zeaxantina como ingredientes funcionales.

Estas perspectivas evidencian que la valorización del cempasúchil trasciende su uso ornamental tradicional y representa una alternativa con potencial para generar ingredientes naturales de alto valor agregado dentro de esquemas de bioeconomía circular, contribuyendo al desarrollo de productos más saludables y sostenibles.

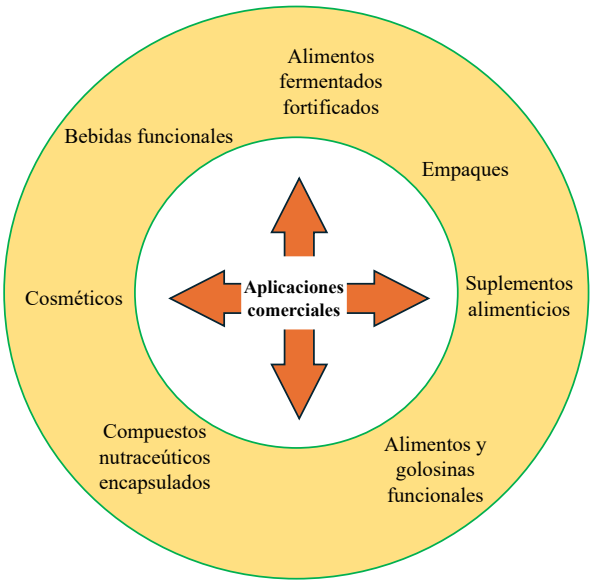


Figura 4. Aplicaciones comerciales potenciales de los carotenoides encapsulados en esferas de alginato

El sistema de encapsulación desarrollado puede favorecer la incorporación de luteína y zeaxantina en alimentos fermentados fortificados, bebidas funcionales, suplementos alimenticios, compuestos nutracéuticos encapsulados, alimentos y golosinas funcionales, empaques activos y formulaciones cosméticas, ilustrando las principales áreas de transferencia tecnológica y desarrollo comercial.

Conclusiones

La extracción y encapsulación de carotenoides totales provenientes de pétalos de *Tagetes erecta* empleando esferas de alginato permitió desarrollar un sistema capaz de proteger estos compuestos naturales y favorecer su liberación gradual en un medio acuoso. La caracterización espectroscópica confirmó la presencia de los carotenoides en el extracto, mientras que los ensayos de liberación demostraron que la cantidad de compuesto liberado aumentó conforme se incrementó la concentración inicial utilizada durante la encapsulación, manteniendo un comportamiento de liberación similar entre las formulaciones.

Más allá de los resultados experimentales, este trabajo demuestra cómo una especie profundamente vinculada al patrimonio cultural mexicano puede convertirse en una fuente de biomoléculas con aplicaciones tecnológicas de alto valor agregado. La utilización de biopolímeros biodegradables como el alginato ofrece una alternativa sostenible para proteger compuestos bioactivos sensibles y ampliar sus posibilidades de incorporación en alimentos funcionales, nutracéuticos y formulaciones cosméticas.

Estos resultados evidencian el potencial de la encapsulación como herramienta para incrementar el aprovechamiento de metabolitos naturales de origen vegetal y representan un punto de partida para el desarrollo de sistemas de liberación controlada más eficientes, con aplicaciones orientadas hacia una bioeconomía basada en recursos renovables.

Bibliografía

Brum, L. F. W., Külkamp-Guerreiro, I. C., da Silva, M. F., & Guterres, S. S. (2017). *Encapsulation of lutein in lipid-core nanocapsules: Physicochemical characterization and stability. Food Chemistry, 217*, 391–398. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.117

Mantovani, R. A., Xavier, A. A. O., Tavares, G. M., & Mercadante, A. Z. (2022). *Lutein bioaccessibility in casein-stabilized emulsions is influenced by the free to acylated carotenoid ratio, but not by the casein aggregation state. Food Research International, 159*, 111778. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111778

Nalawade, P. B., & Gajjar, A. K. (2016). *Microencapsulation of lutein extracted from marigold flowers (Tagetes erecta L.) using full factorial design. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 34*, 90–99. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2016.03.012

Oo, N., Shiekh, K. A., Jafari, S. M., Kijpatanasilp, I., & Assatarakul, K. (2024). *Characterization of marigold flower (Tagetes erecta) extracts and microcapsules: Ultrasound-assisted extraction and subsequent microencapsulation by spray drying. Foods, 13*(15), 2436. https://doi.org/10.3390/foods13152436

Pal, S., & Bhattacharjee, P. (2018). *Spray dried powder of lutein-rich supercritical carbon dioxide extract of gamma-irradiated marigold flowers: Process optimization, characterization and food application. Powder Technology, 334*, 512–521. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.085

Rao, V., & Poonia, A. (2024). *Bioactive compounds, nanoparticles synthesis, health benefits and potential utilization of edible flowers for the development of functional dairy products: A review. Journal of Food Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05853-6

Rodriguez-Amaya, D. B., Esquivel, P., & Meléndez-Martínez, A. J. (2023). Comprehensive update on carotenoid colorants from plants and microalgae: Challenges and advances from research laboratories to industry. *Foods, 12*(22), 4080. https://doi.org/10.3390/foods12224080

Steiner, B. M., McClements, D. J., & Davidov-Pardo, G. (2018). *Encapsulation systems for lutein: A review. Trends in Food Science & Technology, 82*, 71–81. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.003

Thakur, N., Singh, S., Parul, & Bhandari, P. (2026). *Effect of biopolymers and proteins-based microencapsulation on stability and water solubility of temple waste (Tagetes erecta) derived carotenoids. Food Chemistry, 466*, 149725. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.149725

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Zhang, Y. Q., Kong, L. Y., Lawrence, J. C., & Tan, L. B. (2024). *Utilization of biopolymer-based lutein emulsion as an effective delivery system to improve lutein bioavailability in neonatal rats. Nutrients, 16*(3), 422. https://doi.org/10.3390/nu16030422