

Microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica: caracterización fisicoquímica, antioxidante y antimicrobiana

Microencapsulation of pomegranate juice and hibiscus extract: physicochemical, antioxidant, and antimicrobial characterization

Brenda Esmeralda Jiménez-Villeda*, Edna Zaranné Martínez-Ramírez, Marithza Guadalupe Ramírez-Gerardo, Erik Gómez-Hernández

RESUMEN

La microencapsulación mejora la estabilidad y disponibilidad de compuestos bioactivos, como polifenoles de fuentes vegetales, para satisfacer la demanda de alimentos funcionales. Este estudio buscó obtener y caracterizar microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica, evaluando sus propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y antimicrobianas. Los microencapsulados se produjeron mediante secado por aspersión a 100 °C, con una velocidad de alimentación de 4 mL/min, en proporciones de jugo de granada y extracto de jamaica: 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3) y 0:100 (C2). Se analizaron humedad, actividad de agua, solubilidad, color, morfología, capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana al inicio y tras 6 meses de almacenamiento. Los microencapsulados mostraron baja humedad (< 5 %, excepto C1) y actividad de agua (< 0.3), asegurando estabilidad fisicoquímica al limitar reacciones de degradación y crecimiento microbiano. La solubilidad superó el 93 % en todos los tratamientos. Las formulaciones con mayor contenido de extracto de jamaica (M3 y C2) presentaron mayor luminosidad y tonos rojizos. La microscopía electrónica de barrido reveló partículas esféricas con concavidades, sin grietas, típicas del secado por aspersión. Los tratamientos M3 y C2 también exhibieron la mayor capacidad antioxidante, destacando C2 con 4 717.10 mg de Trolox/100 g para ABTS y 4 729.43 mg de equivalente de ácido ascórbico/100 g para DPPH, con inhibiciones del radical del 95.68 % y 80.83 %, respectivamente. Además, M3 y C2, mostraron una inhibición significativa ($P < 0.05$), contra *Escherichia coli*. Tras 6 meses, las propiedades se preservaron parcialmente, especialmente en formulaciones ricas en extracto de jamaica. La microencapsulación de jugo de granada y extracto de jamaica demostró ser una estrategia efectiva para obtener productos con alta solubilidad, actividad antioxidante y antimicrobiana, ideales para aplicaciones en alimentos funcionales.

PALABRAS CLAVE: microencapsulación, jugo de granada, extracto de jamaica, capacidad antioxidante, actividad antimicrobiana.

ABSTRACT

Microencapsulation enhances the stability and bioavailability of bioactive compounds, such as polyphenols from plant sources, to meet the demand for functional foods. This study aimed to produce and characterize microencapsulated pomegranate juice and hibiscus extract, evaluating their physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties. Microencapsulates were obtained by spray drying at 100 °C with a feed rate of 4 mL/min, using pomegranate juice and hibiscus extract ratios of 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3), and 0:100 (C2). Humidity, water activity, solubility, color, morphology, antioxidant capacity, and antimicrobial activity were assessed initially and after 6 months of storage. The microencapsulates exhibited low humidity (< 5 %, except C1) and water activity (< 0.3), ensuring physicochemical stability by limiting degradation reactions and microbial growth. Solubility exceeded 93 % across all treatments. Formulations with higher hibiscus extract content (M3 and C2) showed greater luminosity and reddish hues. Scanning electron microscopy revealed spherical particles with concavities, without cracks, typical of spray drying. Also, the M3 and C2 treatments displayed the highest antioxidant capacity, with C2 recording 4 717.10 mg Trolox/100 g for ABTS and 4 729.43 mg ascorbic acid equivalent/100 g for DPPH, with radical inhibitions of 95.68 % and 80.83 %, respectively. Besides, the M3 and C2 treatments showed significant inhibition ($P < 0.5$) against *Escherichia coli*. After 6 months, properties were partially preserved, especially in rich in hibiscus extract formulations. Microencapsulation of pomegranate juice and hibiscus extract proved effective in producing products with high solubility, antioxidant activity, and antimicrobial properties, making them suitable for functional food applications.

KEYWORDS: microencapsulation, pomegranate juice, hibiscus extract, antioxidant capacity, antimicrobial activity.

*Correspondencia: bjimenez@itsoeh.edu.mx/Fecha de recepción: 28 de enero de 2025/Fecha de aceptación: 8 de mayo de 2025/Fecha de publicación: 30 de mayo de 2025.

TecNM/Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo, Departamento de Ingeniería en Industrias Alimentarias, carretera Mixquiahuala-Tula km 2.5, Paseo del Agrarismo núm. 2000, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México, C. P. 42700.

INTRODUCCIÓN

La producción de fruto de granada (*Punica granatum* L.) en México es amplia por su adaptabilidad a las condiciones climáticas y edáficas; su consumo es mayormente en fresco o bien, es la materia prima para fabricar licores y jugos a nivel artesanal (Betanzos-Cabrera y col., 2015). No obstante, su aprovechamiento se limita a la época de producción (del mes de julio hasta principios del mes de octubre) que es de aproximadamente tres meses por año. El jugo del fruto ha sido estudiado en diversas aplicaciones biológicas debido a la presencia de compuestos bioactivos, como los elagitaninos, punicalagina, punicalina, ácido punícico y ácido elágico, los cuales tienen efectos beneficiosos para la salud humana y han sido evaluados en ensayos *in vitro* e *in vivo* para contrarrestar ciertas enfermedades, como el cáncer, la obesidad, la diabetes, algunos virus como la influenza, infecciones bacterianas e inflamación (Haidari y col., 2009; Khajebishak y col., 2019; Mortada y col., 2020).

La jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.), es una especie ampliamente cultivada en regiones tropicales a nivel mundial (Archaina y col., 2019). Su versatilidad y propiedades funcionales han favorecido su incorporación en diversos productos de la industria alimentaria, incluyendo bebidas, mermeladas, jaleas, licores y harinas para repostería (Borrás-Linares y col., 2015; Archaina y col., 2019;). Diversos estudios han demostrado que *H. sabdariffa* posee efectos benéficos para la salud, atribuidos principalmente a su alta actividad antioxidante. Dicha propiedad está relacionada con la presencia de compuestos bioactivos, como ácidos fenólicos y antocianinas, los cuales desempeñan un papel clave en la neutralización de especies reactivas de oxígeno (Borrás-Linares y col., 2015; Maciel y col., 2018; Vargas-León y col., 2018; Archaina y col., 2019).

La granada (*P. granatum*) y la jamaica (*H. sabdariffa*) presentan actividad antioxidante y antimicrobiana contra patógenos de importancia médica y alimentaria, como *Enteroco-*

ccus faecalis, *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Shigella flexneri* y *Staphylococcus aureus*, entre otros (Betanzos-Cabrera y col., 2015; Borrás-Linares y col., 2015). Sin embargo, los compuestos bioactivos de los extractos de granada y jamaica tienen una alta susceptibilidad a la degradación, debido a factores como la temperatura, la luz y el oxígeno, lo que limita su estabilidad y funcionalidad en aplicaciones industriales (Jafari y col., 2017; Archaina y col., 2019).

La microencapsulación representa una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad y funcionalidad de compuestos bioactivos sensibles a factores ambientales. En el caso del jugo de granada y el extracto de jamaica, el proceso de secado por aspersión ha demostrado ser efectivo para proteger sus compuestos fenólicos y antioxidantes frente a la degradación por temperatura, luz y oxígeno (Ribeiro y col., 2020). Además, facilita su incorporación en productos alimentarios, mejorando su biodisponibilidad y prolongando su vida útil. Diversos estudios han explorado el uso de matrices encapsulantes como malto-dextrinas (MD) y gomas naturales para optimizar la retención de estos compuestos, obteniendo microcápsulas con propiedades físico-químicas adecuadas para su aplicación industrial (Archaina y col., 2019; Álvarez-Cervantes y col., 2021). Durante el proceso de secado por aspersión, se mezclan los componentes del núcleo (los compuestos bioactivos) y los componentes de la pared (polisacáridos y proteínas) para crear una emulsión que luego se atomiza en una cámara de secado (Dhakal y He, 2020). Ello permite procesar materiales líquidos, como los jugos, que son sensibles al calor, sin afectar significativamente su calidad, además de ser una técnica de microencapsulación económica (Ye y col., 2018).

Archaina y col. (2019), microencapsularon un extracto de jamaica mediante secado por aspersión, reportando que las matrices de MD y goma arábiga (GA) fueron una buena opción para producir polvos de jamaica con ex-

celentes propiedades físicas: bajo contenido de humedad ($< 1.7 \text{ g H}_2\text{O}/100 \text{ g}$ de muestra de peso seco) y actividad de agua (< 0.26); alta temperatura de transición vítrea ($42 \text{ }^\circ\text{C}$ a $48 \text{ }^\circ\text{C}$) y alta solubilidad ($> 99 \%$). Los polvos mostraron baja cohesividad y buena fluidez. Además de retener eficazmente las antocianinas, polifenoles y la capacidad antioxidante.

El objetivo del presente trabajo fue obtener un microencapsulado a partir del jugo de granada madura (*P. granatum*) adicionado con extracto de jamaica (*H. sabdariffa*) mediante secado por aspersión, con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y su actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y *Salmonella typhimurium*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se recolectaron granadas maduras (*Punica granatum* L.) en el Valle de Mezquital, Hidalgo, México, entre los meses de julio y septiembre de 2024. Los cálices secos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) se obtuvieron de un mercado en Tula de Allende, Hidalgo, México.

Reactivos químicos

Se emplearon GA E-414 (Diquitra®, Estado de México, México) y MD 20 DE (Cazel®, Oaxaca, México) como materiales de pared. Los reactivos fenol Folin-Ciocalteu, 2, 2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH•), ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico (Trolox) y persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) se adquirieron de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE. UU.). El citrato de sodio se obtuvo de Golden Bell Reactivos (Ciudad de México, México). El Agar para métodos estándar y caldo de soya triptica-seína fueron de la marca DB Bioxon®.

Obtención del jugo de granada

Las granadas se lavaron cuidadosamente frotando la superficie con una solución de agua potable y jabón en el laboratorio, posteriormente se cortaron por la mitad para extraer el jugo, utilizando un exprimidor mecánico para cítricos. El jugo obtenido se filtró

con un colador fino para remover partículas sólidas; se sometió a un proceso de pasteurización ($85 \text{ }^\circ\text{C}$ por 15 min) y se almacenó en condiciones de refrigeración a $4 \text{ }^\circ\text{C}/24 \text{ h}$, asegurando su protección contra la exposición a la luz en envases ámbar.

Extracto acuoso de jamaica

Se elaboró un extracto a partir de cálices secos de jamaica (15% p/v), mezclando 15 g de cálices con 100 mL de agua destilada y manteniendo la solución a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 min. El extracto se filtró al vacío 2 veces utilizando papel Whatman N° 2, siguiendo el procedimiento descrito por Archaina y col. (2019) y se almacenó en condiciones de refrigeración a $4 \text{ }^\circ\text{C}/24 \text{ h}$, protegido de la luz en envases ámbar.

Preparación de las formulaciones

Se combinaron el jugo de granada y el extracto de jamaica (JG:EJ) utilizando proporciones específicas de 100:0 (C1), 70:30 (M1), 50:50 (M2), 30:70 (M3) y 0:100 (C2), expresadas en términos de porcentaje en volumen.

Las soluciones fueron combinadas con una proporción 85:15 de MD y GA, respectivamente, y ajustadas a un contenido de sólidos totales del 30% (p/v). Las soluciones se sometieron a agitación magnética durante 10 min para dispersar los hidrocoloides y se homogenizaron a 6 000 rpm durante 5 min con homogenizador Ultra Turrax T-25 SI (IKA Works, Wilmington, NC, EE. UU.).

Secado por aspersión

La microencapsulación se llevó a cabo mediante un secador por aspersión de laboratorio modelo Buchi B-191 (Labortechnik AG, Flawil, Suiza). Se utilizó temperatura de entrada de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura de salida de $62 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. El flujo de líquido (velocidad de alimentación) se mantuvo constante a 4 mL/min , utilizando una boquilla de 0.5 mm de diámetro y la presión del aire se ajustó a 3.0 bar. Los polvos obtenidos se almacenaron herméticamente en bolsas de plástico a $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta su análisis.

Caracterización de encapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica

Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad en las microcápsulas se realizó siguiendo el método 44-15.02 (AACC, 2000). Se pesaron 2 g de muestra y se distribuyeron en charolas de aluminio, posteriormente se sometieron a un proceso de secado en una estufa (Biobase, BOV-D125, China) a una temperatura de 105 °C/24 h. El contenido de humedad se estimó mediante la diferencia del peso antes y después del secado de la muestra, de acuerdo con la ecuación 1:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Actividad de agua (aw)

Se empleó un equipo Aqua Lab (LITE, Washington, EE. UU.) que opera bajo el principio de equilibrio de presión de vapor. Las muestras se colocaron en contenedores propios del equipo, y la medición se realizó a temperatura ambiente (± 25 °C).

Solubilidad

Se vertieron 100 mL de agua destilada en un recipiente de vidrio. Posteriormente, se pesó cuidadosamente 1 g del polvo y se añadió al recipiente a temperatura ambiente (± 25 °C). La solución resultante se agitó inmediatamente utilizando un homogeneizador Ultra Turrax T-25 SI (IKA Works, Wilmington, NC, EE. UU.) a 15 000 rpm durante 3 min. Luego, se centrifugó (Sigma, modelo 3-30 k, Alemania), a 3 000 rpm durante 5 min a temperatura ambiente (± 25 °C). El sobrenadante se vertió cuidadosamente en placas limpias y previamente pesadas, las cuales se secaron en una estufa a 105 °C/5 h hasta alcanzar un peso constante. El peso de la materia seca fue utilizado como base para calcular la solubilidad del polvo.

Color

Se empleó la escala de color CIE L* C* H* utilizando un analizador de color portátil (Kaalee, WR10QC, China). Las muestras se

prepararon homogéneamente y se colocaron en una superficie uniforme para la medición. El dispositivo registró los valores L* (luminosidad), a* (verde-rojo) y b* (azul-amarillo). Posteriormente, se calcularon los valores de C* (croma) y H* (tono o matiz) de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3:

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (2)$$

$$H^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3)$$

Morfología de las microcápsulas

La morfología de las microcápsulas se observó con un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscope) (model JEOL JSM-6300, Akishima, Tokyo, Japan). Las muestras secas se colocaron en un portaobjetos recubierto con cinta electroconductora de carbono de doble cara, y posteriormente se recubrieron con una capa de oro de 0.5 nm a 1 nm de espesor durante 3 min. Las observaciones se realizaron bajo condiciones de 15 A y 20 kV.

Capacidad antioxidante

Acondicionamiento de la muestra

Para cuantificar la capacidad antioxidante de las microcápsulas mediante las técnicas ABTS y DPPH, se llevó a cabo la destrucción completa de su estructura. Se pesaron 200 mg de microcápsulas en un tubo Eppendorf, a los cuales se añadieron 2.0 mL de agua. La mezcla fue agitada vigorosamente durante 5 min, y posteriormente centrifugada a 7 000 $\times$ g (MiniSpin plus, Eppendorf, Alemania) durante 10 min. El sobrenadante obtenido se filtró a través de un filtro de membrana con un tamaño de poro de 0.45 μ m, y el filtrado resultante se utilizó para las pruebas de ABTS y DPPH.

ABTS

La capacidad de captación del radical ABTS fue evaluada de acuerdo con lo descrito por Martínez-Ramírez y col. (2024) con algunas modificaciones. El radical se generó median-

te la reacción del ácido 2,2'-azino-bis (3-etil-benzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) a una concentración de 7 mM con $K_2S_2O_8$ (2.45 mM), incubándose a temperatura ambiente en ausencia de luz durante 16 h. Posteriormente, se mezclaron 1 050 μ L de la solución del radical con 50 μ L de la solución del microencapsulado (cápsulas disueltas en una solución de citrato de sodio al 2 %). Después, la mezcla se agitó en vórtex durante 2 min con un vortex Velp Scientifica XZ3 (Monza y Brianza, Italia) y se centrifugó a 10 000 rpm durante 3 min con una centrífuga Eppendorf 5804R (Hamburgo, Alemania), permitiendo que la mezcla reaccionara durante 30 min en oscuridad. La absorbancia se midió a 732 nm; los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de Trolox (mg ETrolox/100 g de muestra de peso seco). La inhibición del radical ABTS se calculó de acuerdo a la ecuación 4.

$$\% \text{ inhibición} = \frac{\text{Abs inicial}_{ABTS} - \text{Abs final}_{ABTS}}{\text{Abs inicial}_{ABTS}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

Abs inicial_{ABTS} = Absorbancia del radical ABTS antes de la reacción con la muestra.

Abs final_{ABTS} = Absorbancia del radical ABTS después de la reacción con la muestra.

DPPH

La capacidad de reducción del radical estable DPPH de los microencapsulados fue determinada utilizando 1 050 μ L del radical estable 2,2-difenil-1-picrilhidrazina (DPPH), que reaccionó con 50 μ L del microencapsulado durante 30 min en la oscuridad, siguiendo los métodos de Martínez-Ramírez y col. (2024). La absorbancia fue medida a 515 nm, y los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de ácido ascórbico (mg EAA/100 g de peso seco). La inhibición del radical DPPH se calculó de acuerdo a la ecuación 5.

$$\% \text{ inhibición} = \frac{\text{Abs inicial}_{DPPH} - \text{Abs final}_{DPPH}}{\text{Abs inicial}_{DPPH}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Abs inicial_{DPPH} = Absorbancia del radical DPPH antes de la reacción con la muestra.

Abs final_{DPPH} = Absorbancia del radical DPPH después de la reacción con la muestra.

Estabilidad fisicoquímica de los microencapsulados a temperatura ambiente

Las muestras de los diferentes tratamientos se almacenaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) y humedad relativa constante, evitando la exposición a la luz directa, durante un periodo de hasta 6 meses, para determinar cambios en la capacidad antioxidante de los polvos.

Actividad antimicrobiana de los polvos

La actividad antimicrobiana de los tratamientos microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica se evaluó mediante el método de difusión en pozos, basado en Borrás-Linares y col. (2015) con modificaciones. Se utilizaron 100 μ L de suspensiones de *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* y *Listeria monocytogenes*, cultivadas en caldo de soya tripticaseína a 37 °C/24 h. Tras el cultivo, las células fueron lavadas y resuspendidas en solución salina estéril (NaCl, 0.9 %) hasta alcanzar una densidad óptica a 660 nm (OD660) de 0.5, equivalente a 6 log UFC/mL. Cada suspensión se inoculó en agar por vertido y, tras la solidificación, se perforaron pozos de 6 mm de diámetro. En cada pozo se depositaron 50 μ L de las cápsulas disueltas en una solución de citrato de sodio al 2 %. Luego de la absorción del líquido, las placas se incubaron a 37 °C/24 h, y finalmente, se midieron los diámetros de las zonas de inhibición en milímetros.

Análisis estadístico

Todos los análisis se llevaron a cabo por triplicado. El procesamiento estadístico de los datos se realizó con el software Statistica, versión 7.0, StatSoft (2009). Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) seguido de la prueba de comparación múltiple de Tukey ($P < 0.05$).

RESULTADOS

Obtención de microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica

El proceso de microencapsulación mediante

secado por aspersión demostró ser una opción de proceso efectiva, que permitió obtener cinco muestras en forma de polvos finos, fáciles de manipular, con consistencia suave y granular y sin signos de apelmazamiento, lo cual puede atribuirse a la temperatura de entrada (100 °C) utilizada en el secador y que, además está estrechamente relacionada con el rendimiento del proceso, ya que influye directamente en la transferencia de calor y masa (Díaz-López y col., 2023).

Caracterización de las microcápsulas

Humedad

Los niveles de humedad iniciales fueron inferiores a 5 % excepto para la muestra (C1) (Tabla 1), valor considerado aceptable (Rodríguez y col., 2017) por influir favorablemente en la estabilidad de los compuestos microencapsulados (Álvarez-Cervantes y col., 2021).

El contenido de humedad de todas las muestras aumentó después de 6 meses, lo que indica una reabsorción de agua desde el am-

biente, fenómeno esperado en productos secos almacenados sin un control adecuado de la humedad relativa. Los tratamientos C1 y M1, ambos con contenido predominante de jugo de granada, alcanzaron valores de 8.03 % y 5.56 %, respectivamente, valores por encima de lo recomendado y que se asocia con pérdida de la estabilidad estructural y funcional de los microencapsulados. La mayor capacidad de absorción de agua del jugo de granada puro podría deberse a su alto contenido de compuestos hidrofílicos.

Las muestras que contenían extracto de jamaica, como M2, M3 y C2, mantuvieron un contenido de humedad por debajo de 5 % al término de los 6 meses, lo que indica que la incorporación de jamaica podría tener un efecto positivo en la reducción de la absorción de humedad. Este comportamiento es consistente con estudios previos que sugieren que los compuestos polifenólicos y la fibra, presentes en la jamaica, podrían contribuir a una mayor estabilidad en condiciones de almacenamiento (Tonon y col., 2010).

■ Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica después del secado y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 1. Physicochemical properties of pomegranate juice and hibiscus extract microcapsules after drying and after 6 months of storage

Tratamientos (JG:EJ)	Humedad (%)	Actividad de agua	Solubilidad (%)
C1, 100:0	6.62 ± 0.16 ^c	0.29 ± 0.02 ^a	93.77 ± 0.25 ^a
M1, 70:30	4.40 ± 0.32 ^b	0.26 ± 0.01 ^a	94.73 ± 0.15 ^{ab}
M2, 50:50	3.69 ± 0.16 ^a	0.27 ± 0.02 ^a	95.66 ± 0.19 ^{bc}
M3, 30:70	3.22 ± 0.11 ^a	0.27 ± 0.00 ^a	94.63 ± 0.13 ^{ab}
C2, 0:100	3.24 ± 0.30 ^a	0.27 ± 0.01 ^a	96.32 ± 0.90 ^c
Después de 6 meses de almacenamiento			
C1, 100:0	8.03 ± 0.20 ^d	0.32 ± 0.01 ^a	92.80 ± 0.35 ^b
M1, 70:30	5.56 ± 0.29 ^c	0.29 ± 0.01 ^a	93.67 ± 0.40 ^a
M2, 50:50	4.58 ± 0.11 ^b	0.30 ± 0.00 ^a	94.28 ± 0.38 ^a
M3, 30:70	4.09 ± 0.18 ^{ab}	0.29 ± 0.01 ^a	93.71 ± 0.16 ^a
C2, 0:100	3.96 ± 0.14 ^a	0.30 ± 0.02 ^a	95.46 ± 0.10 ^c

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$), prueba de Tukey.

Actividad del agua

El valor de actividad de agua (a_w) representa la fracción de agua libre, disponible en el sistema. Los valores de a_w en todos los tratamientos fueron inferiores a 0.3 (Tabla 1), valor que se considera adecuado para mantener la estabilidad del polvo y prolongar su vida útil (Reyes y col., 2018). Este nivel de a_w indica una limitada cantidad de agua libre disponible para participar en reacciones bioquímicas, fisicoquímicas y el desarrollo microbiano, entre otras, y que deterioran la calidad del producto, reduciendo el riesgo de degradación fisicoquímica, el desarrollo microbiano, pardeamiento enzimático, reacciones hidrolíticas, oxidación lipídica y enzimáticas durante el almacenamiento (Marques y col., 2007; Archaina y col., 2019). Los valores obtenidos son similares a los reportados por Hernández-López y col. (2018), quienes usaron también una temperatura de entrada de 100 °C, para microencapsular *Lactobacillus pentosus*, utilizando como pared una matriz de pulque y almidón. A esta condición de secado se genera una transferencia de calor en las partículas que incrementa la fuerza motriz de la evaporación y que favorece una mayor eliminación de agua, resultando en polvos con un menor contenido de humedad (Daza y col., 2016).

Después de 6 meses de almacenamiento, los 5 tratamientos registraron un aumento en la a_w , asociado con el mayor contenido de humedad (Tabla 1), sin que se alcanzara, aparentemente un cambio del estado vítreo que se manifiesta con la presencia de aglomeración de las partículas o la degradación estructural de la matriz encapsulante (Jafari y col., 2017). Archaina y col. (2019) reportaron valores de a_w similares (0.33) en microencapsulados de jamaica obtenidos mediante secado por aspersión que mantuvieron su estructura en almacenamiento.

Solubilidad

La solubilidad de todos los tratamientos de microencapsulados se presentó por encima del 93 % (Tabla 1), lo cual se puede atribuir

a que el uso de MD con un valor alto de equivalente de dextrosa (DE) mejora la reconstitución de los polvos (Archaina y col., 2019). El valor fue mayor ($P < 0.05$) para el control de extracto de jamaica (C2), que para el de jugo de granada (C1). Después de 6 meses de almacenamiento la solubilidad descendió ligeramente en todas las muestras, aunque la mayoría conservaron su solubilidad por encima del 93 %. Los tratamientos con extracto de jamaica preservaron mejor la solubilidad, esto debido probablemente a la mayor presencia de compuestos fenólicos, que pueden interactuar con los agentes encapsulantes y darle estabilidad del polvo (Nguyen y col., 2022).

La solubilidad es un factor esencial para evaluar el comportamiento de un producto en fase acuosa y constituye un criterio fundamental para determinar la calidad de reconstitución de los polvos (Choudhury y col., 2021). Para los consumidores, la capacidad de los productos en polvo, de disolverse de manera rápida y completa, representa uno de los principales indicadores de calidad. Diversos factores pueden influir en esta propiedad, entre ellos, la composición inicial de la materia prima destinada al secado por aspersión, los agentes portadores, las tasas de flujo de aire comprimido y las bajas velocidades de alimentación (Jafari y col., 2017).

Color

Las proporciones de jugo de granada (M1) y extracto de jamaica (M3), tuvieron los mismos valores en L^* (luminosidad), lo cual, posiblemente afectó los valores de H^* (tono o matiz) (Tabla 2). Este fenómeno se puede explicar mediante la interacción de factores como la concentración de compuestos naturales en las materias primas y los efectos térmicos durante el proceso de secado. El tratamiento C1 (100:0, granada: jamaica) presentó un H^* de 20.31, indicando un tono rojo menos intenso que el tratamiento C2 (0:100 granada: jamaica) con valor de 4.89, que sugiere un tono rojo más puro. En las soluciones de jugo de granada y extracto de jamaica se observó una

■ Tabla 2. Comparación de los valores promedio de color de los diferentes tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica en polvo, después del secado y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 2. Comparison of the average color values of different treatments of pomegranate juice and hibiscus extract powders, after drying and after 6 months of storage.

Tratamientos (JG:EJ)	Color		
	L*	C*	H*
C1, 100:0	45.71 ± 0.00 ^a	5.56 ± 0.08 ^b	20.31 ± 0.32 ^c
M1, 70:30	55.50 ± 2.97 ^b	17.96 ± 1.40 ^c	10.07 ± 0.97 ^a
M2, 50:50	50.31 ± 0.78 ^c	24.10 ± 0.79 ^d	10.36 ± 0.48 ^a
M3, 30:70	58.69 ± 0.95 ^b	30.43 ± 1.06 ^a	9.09 ± 1.60 ^a
C2, 0:100	45.41 ± 1.31 ^a	31.74 ± 3.09 ^a	4.89 ± 3.60 ^b
Después de 6 meses de almacenamiento			
C1, 100:0	95.68 ± 0.18 ^e	4.81 ± 0.22 ^a	23.67 ± 1.17 ^c
M1, 70:30	89.83 ± 0.15 ^d	16.01 ± 0.78 ^b	11.76 ± 1.59 ^a
M2, 50:50	72.63 ± 0.22 ^c	21.33 ± 0.17 ^c	12.89 ± 0.37 ^a
M3, 30:70	69.78 ± 0.14 ^b	24.82 ± 0.22 ^d	10.54 ± 1.20 ^a
C2, 0:100	61.51 ± 0.17 ^a	29.09 ± 0.22 ^e	1.06 ± 0.77 ^b

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$), prueba de Tukey. L*: Luminosidad, C*: Croma, H*: Tono o matiz.

tendencia clara: a mayor proporción de extracto de jamaica, el matiz (H*) se desplazó hacia tonos más rojos. Esta variación puede atribuirse a la mayor concentración de antocianinas y otros compuestos fenólicos como en el extracto de jamaica, que influyen en la percepción del color. Estudios recientes han demostrado que la estabilidad y el tono del color en productos de granada están también directamente relacionados con la concentración de estos compuestos. Además, la interacción de las antocianinas con otros componentes puede afectar el matiz percibido en productos derivados de este fruto (Türkyılmaz y col., 2023).

El valor del parámetro C* fue significativamente superior ($P < 0.05$) en los tratamientos M3 y C2 en comparación con C1 (Tabla 2). Este incremento se relaciona con el aumento en la proporción de extracto de jamaica en la solución, lo cual indica una intensificación del tono rojizo de los polvos. Dicho comportamiento es consistente con estudios previos

que sugieren que el extracto de jamaica, rico en antocianinas, produce colores rojos intensos (Archaina y col., 2019).

Los dos tratamientos control (C1 y C2) presentaron un valor similar de L* (≈ 45) que fue superior en los tratamientos con combinaciones de ambos productos (50 a 58) (Tabla 2) sugiriendo un efecto aditivo entre ambos.

Los parámetros de H* registraron una tendencia decreciente conforme aumentó la proporción de extracto de jamaica ($P < 0.05$). El tratamiento C1 presentó el valor más alto de H*, lo cual indica una tonalidad más cercana al rojo-anaranjado. En contraste, el tratamiento C2 registró el valor más bajo, reflejando un tono rojo más puro (Tabla 2). También el parámetro C* mostró una tendencia a disminuir ($P < 0.05$) su valor durante el almacenamiento en todas las muestras que contenían jugo de granada, lo que sugiere la degradación parcial de antocianinas y otros pigmentos. Este fenómeno es consistente con

lo reportado por Tonon y col. (2010), quienes indicaron que la estabilidad del color en polvos microencapsulados depende del tipo de material encapsulante y de las condiciones de almacenamiento.

Los valores de L^* aumentaron en todos los tratamientos después de 6 meses, indicando coloración más clara, un fenómeno asociado a la oxidación de pigmentos debido a reacciones de degradación térmica y oxidativa (Jafari y col., 2017). El tratamiento C1 mostró el mayor incremento en L^* (95.68 ± 0.18), al igual que M1 (89.83 ± 0.15) lo que sugiere una pérdida significativa del color característico de la granada. En contraste, la muestra con mayor proporción de extracto de jamaica (M3) presentó la menor pérdida, lo que podría atribuirse a la mayor estabilidad de sus antocianinas jamaica, en comparación con las de la granada, como se ha documentado en estudios sobre la estabilidad de antocianinas en diferentes matrices alimentarias (Türkyılmaz y col., 2023).

El color del microencapsulado es un factor visual importante, que influye en la aceptación del consumidor (Jiménez-González y Guerrero-Beltrán, 2021), aunque también debe considerarse la percepción del color después de reconstituir el microencapsulado en un producto final, y su impacto en la apariencia y aceptación sensorial global. Sin embargo, adicional a esta percepción sensorial, los cambios de color asociados con el almacenamiento de las muestras sugieren la oxidación de los pigmentos y podría ser un indicador de la pérdida de otras propiedades funcionales deseables de sus compuestos bioactivos (Türkyılmaz y col., 2023).

Morfología de las microcápsulas

Las micrografías obtenidas mediante SEM, reflejaron que los polvos de los diferentes tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica están compuestos de micropartículas de diámetro variable (Figura 1) que muestran morfologías típicas de polvos secados por aspersión, como esferas arrugadas carac-

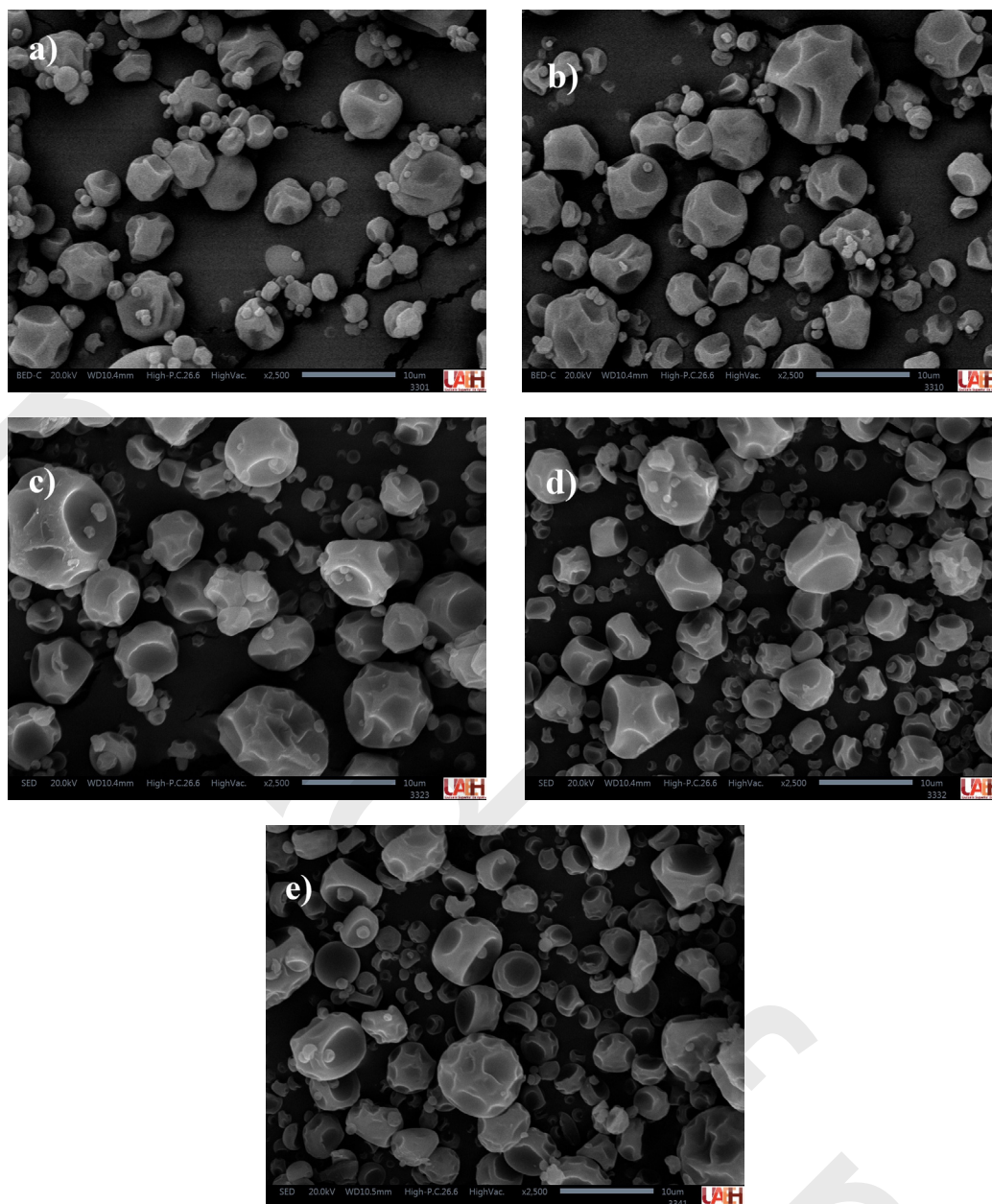
terizadas por numerosas y grandes concavidades formadas durante la rápida evaporación de las gotas de líquido (Tatasciore y col., 2024). Los parámetros del secador por aspersión, como la temperatura, la velocidad de alimentación y la composición de la solución encapsulante, influyen significativamente en la forma de los polvos (Rezende y col., 2018).

Las micropartículas obtenidas en este estudio presentaron superficies externas intactas, sin grietas ni complicaciones visibles, lo que indica una excelente capacidad de la MD y GA para formar películas protectoras. Además, se observaron microcápsulas con tamaños que varían entre $4 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$. Tonon y col. (2008) también obtuvieron microcápsulas de tamaños pequeños, concluyendo que las partículas de menor tamaño se generan al utilizar temperaturas más bajas en el aire de entrada ($< 124^\circ\text{C}$), ya que esto favorece una mayor contracción. Un comportamiento similar fue observado por Jafari y col. (2017), quienes microencapsularon jugo de granada utilizando MD como material encapsulante.

Capacidad antioxidante

La prueba de captación del radical ABTS, mostró que el tratamiento control C1 alcanzó una concentración de $2\,563.47 \text{ mg}$ de ETrolox/100 g de muestra de peso seco, con un porcentaje de inhibición del 60.45 %. Esta técnica evalúa la transferencia de electrones (hidrógenos), permitiendo la detección de antioxidantes presentes en la muestra. En el caso del radical DPPH, el mismo control presentó una concentración de 534.31 mg E.A.A./100 g de muestra de peso seco y una inhibición del 19.92 %. Estos resultados sugieren que el jugo de granada, por sí solo (C1), posee una capacidad antioxidante significativa.

El tratamiento control C2 alcanzó una concentración de $4\,717.10 \text{ mg}$ de ETrolox/100 g de muestra de peso seco, con un porcentaje de inhibición del 95.68 %; y de $4\,729.43 \text{ mg}$ E.A.A./100 g de muestra de peso seco, con inhibición del 80.83 %, ambos valores significativamente mayores ($P < 0.05$) respecto a los alcanzados por



■ **Figura 1.** Micrografías de microcápsulas obtenidas a partir de tratamientos de jugo de granada y extracto de jamaica (JG:EJ) en diferentes proporciones a) C1 (100:0), b) M1 (70:30), c) M2 (50:50), d) M3 (30:70) y e) C2 (0:100), respectivamente.

Figure 1. Micrographs of microcapsules obtained from treatments of pomegranate juice and hibiscus extract (PJ:HE) in different proportions a) C1 (100:0), b) M1 (70:30), c) M2 (50:50), d) M3 (30:70) and e) C2 (0:100), respectively.

el jugo de granada (Tabla 3). Al incrementar la proporción de extracto de jamaica en las tres mezclas, se observó un aumento en la actividad antioxidante e inhibitoria para ABTS y DPPH, con un rendimiento superior al del tratamiento C1.

El efecto antioxidante observado puede atribuirse a los metabolitos secundarios presentes en la granada y la jamaica. En particular, estudios previos han reportado que *P. granatum* contiene compuestos bioactivos como elagitaninos, punicalagina, punicalina, ácido

■ Tabla 3. Actividad antioxidante de los diferentes tratamientos con jugo de granada y extracto de jamaica, inmediatamente después del secado por aspersión y tras 6 meses de almacenamiento.

Table 3. Antioxidant activity of the different treatments with pomegranate juice and hibiscus extract immediately after spray drying and after 6 months of storage.

Tratamientos (JG:EJ)	ABTS		DPPH	
	mg ETrolox/100 g de muestra en peso seco	Inhibición %	mg EA.A/100 g de muestra en peso seco	Inhibición %
C1, 100:0	2 563.47 ± 113.04 ^e	60.45 ± 1.85 ^c	534.31 ± 64.96 ^d	19.92 ± 0.94 ^d
M1, 70:30	2 772.17 ± 34.70 ^d	63.86 ± 0.57 ^c	820.49 ± 175.61 ^c	24.07 ± 2.55 ^c
M2, 50:50	3 905.50 ± 36.20 ^c	82.40 ± 0.59 ^b	826.99 ± 14.90 ^c	24.17 ± 0.22 ^c
M3, 30:70	4 070.72 ± 42.89 ^b	85.11 ± 0.70 ^b	1402.60 ± 141.49 ^b	32.53 ± 2.05 ^b
C2, 0:100	4 717.10 ± 65.27 ^a	95.68 ± 1.07 ^a	4 729.43 ± 43.99 ^a	80.83 ± 0.64 ^a
Después 6 meses de almacenamiento				
C1, 100:0	714.96 ± 89.92 ^d	31.90 ± 2.79 ^d	120.18 ± 21.27 ^c	8.32 ± 0.54 ^c
M1, 70:30	861.90 ± 12.47 ^c	36.46 ± 0.39 ^c	309.65 ± 42.54 ^b	13.13 ± 1.08 ^b
M2, 50:50	936.73 ± 54.94 ^c	38.78 ± 1.71 ^c	436.46 ± 10.96 ^a	16.24 ± 0.28 ^a
M3, 30:70	1 114.96 ± 51.03 ^b	44.32 ± 1.58 ^b	416.67 ± 35.04 ^a	15.84 ± 0.89 ^a
C2, 0:100	1 287.75 ± 22.73 ^a	49.68 ± 0.71 ^a	439.47 ± 34.51 ^a	16.42 ± 0.88 ^a

JG: jugo de granada, EJ: extracto de jamaica. Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar C1 y C2: controles. M1, M2 y M3: mezclas. ^{a, b, c}Valores con letras minúsculas diferentes en la misma columna expresan diferencia estadísticamente significativa (P < 0.05), prueba de Tukey.

punícico y ácido elágico, los cuales, debido a su notable capacidad antioxidante, han demostrado beneficios para la salud humana en ensayos *in vitro* e *in vivo* (Haidari y col., 2009; Khajebishak y col., 2019; Mortada y col., 2020). Por otro lado, investigaciones sobre la jamaica han demostrado sus efectos beneficiosos para la salud, principalmente atribuidos a su alta actividad antioxidante, gracias a la presencia de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y antocianinas. Estos compuestos juegan un papel fundamental en la neutralización de especies reactivas de oxígeno, proporcionando un efecto protector frente al daño celular (Borrás-Linares y col., 2015; Maciel y col., 2018; Vargas-León y col., 2018; Archaina y col., 2019).

Los tratamientos conteniendo jugo de granada y extracto de jamaica microencapsulados mostraron capacidad antioxidante, que permanecen durante el proceso de secado por aspersión, especialmente cuando se aumenta la proporción de extracto de jamaica, lo que permite considerar a estos ingredientes naturales como fuentes funcionales de com-

puestos bioactivos para aplicaciones en la industria alimentaria y de suplementos (Archaina y col., 2019).

Estabilidad los microencapsulados después de 6 meses a temperatura ambiente

El almacenamiento por 6 meses a temperatura ambiente (± 25 °C), de los polvos microencapsulados, indujo una reducción significativa en la concentración de antioxidantes y en la capacidad de inhibición de los radicales ABTS y DPPH en todas las formulaciones (Tabla 3). El tratamiento control C1 mostró actividad antioxidante de 31.90 % y 8.32 %, respectivamente, valores menores a los presentados por el tratamiento C2 con valores de 49.68 % y 16.42 %. Ambos tratamientos mantuvieron una actividad antioxidante relativa, con inhibiciones del 36.46 % al 44.32 % para ABTS y del 13.13 % al 16.24 % para DPPH.

La disminución de la actividad antioxidante podría estar relacionada con la degradación de compuestos bioactivos, como polifenoles, taninos y alcaloides, debido a factores como

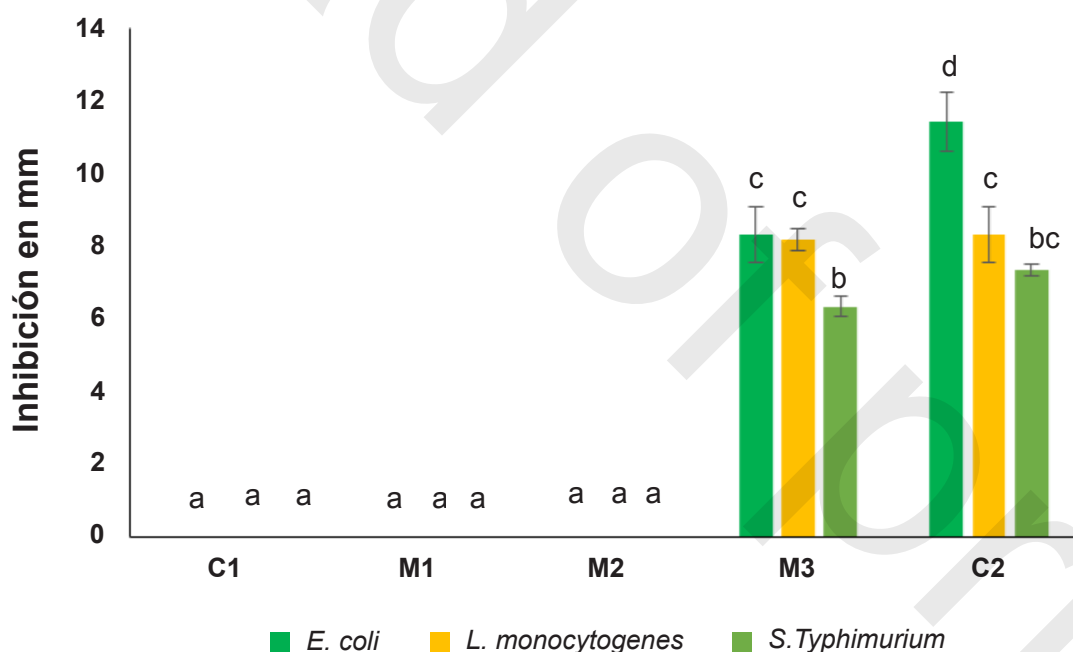
la exposición al oxígeno, la humedad y la luz, como lo sugieren estudios previos (Ochoa-Reyes y col., 2022). Sin embargo, que los tratamientos mantuvieran actividad antioxidante tras seis meses, sugiere que estos microencapsulados podrían ser una opción viable para aplicaciones en la industria alimentaria, donde se requiere una funcionalidad prolongada en productos procesados (Ozkan y col., 2019).

Capacidad antimicrobiana

El tratamiento C1, compuesto de solo jugo de granada, no presentó actividad antimicrobiana contra *E. coli*, *L. monocytogenes* y *Salmonella* Typhimurium (Figura 2), ya que en el análisis microbiológico no indujo la formación de halo de inhibición y tampoco lo hicieron los tratamientos M1 y M2, que lo contenían hasta en un 50 %. En contraste, el tra-

tamiento C2 (solo extracto de jamaica) mostró una inhibición significativa del crecimiento bacteriano, con particular eficacia para *E. coli*, con halo de inhibición de 11.43 ± 0.81 mm. El tratamiento M3 conteniendo (70 % de extracto de jamaica fue el único que mostró una inhibición significativa del crecimiento bacteriano.

Estos resultados indicaron que solo el extracto de jamaica tuvo efecto inhibidor del crecimiento de microorganismos a las condiciones estudiadas, probablemente debido a su alta concentración de antocianinas y polifenoles, compuestos bioactivos conocidos por su capacidad de alterar la membrana celular de las bacterias y suprimir su crecimiento, lo que demuestra su efectividad como agente antimicrobiano (Portillo-Torres y col., 2019; Izquierdo-Vega y col., 2020). Rangel-Vargas y col. (2017)



■ Figura 2. Efecto antimicrobiano de los tratamientos microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica contra *E. coli*, *S. Typhimurium* y *L. monocytogenes* en diferentes proporciones: C1 (100:0), M2 (70:30), M3 (50:50), M4 (30:70) y C2 (0:100), correspondientes a las proporciones de jugo de granada y extracto de jamaica, respectivamente.

Figure 2. Antimicrobial effect of the microencapsulated treatments of pomegranate juice and hibiscus extract against *E. coli*, *S. Typhimurium*, and *L. monocytogenes* in different proportions: C1 (100:0), M2 (70:30), M3 (50:50), M4 (30:70), and C2 (0:100), corresponding to the proportions of pomegranate juice and hibiscus extract, respectively.

encontraron que extractos acuosos de jamaica fueron efectivos en la reducción de poblaciones de *L. monocytogenes*, *S. Typhimurium* y *E. coli* en alimentos. La mayor eficacia observada en C2, y su pérdida a partir de su adición en proporción 50:50, sugiere una relación dosis-dependiente entre la concentración de extracto de jamaica y la actividad antimicrobiana.

Los tratamientos C2 y M3 perdieron parcialmente su capacidad antimicrobiana contra los patógenos evaluados después de 6 meses de almacenamiento. Este fenómeno puede atribuirse a la degradación de antocianinas y polifenoles, compuestos bioactivos presentes en el extracto de jamaica responsables de la actividad antimicrobiana (Portillo-Torres y col., 2019).

La temperatura de almacenamiento influye en la estabilidad de las antocianinas. A mayor temperatura, se incrementa la tasa de degradación de estos compuestos. Un estudio indicó que las antocianinas presentes en extractos de gulupa (*Passiflora edulis*, Sims) mostraron la mayor tasa de degradación a temperatura ambiente (21 °C), seguida por refrigeración (5 °C) y congelación (-14 °C), donde fueron más estables (Meneses-Marentes y col., 2019).

CONCLUSIONES

El proceso de secado por aspersión confirió adecuadas propiedades fisicoquímicas de los microencapsulados de jugo de granada y extracto de jamaica, y permitió preservar su

capacidad antioxidante. Los tratamientos C2 (extracto de jamaica) y M3 (30:70, jugo de granada y extracto de jamaica) fueron las muestras más prometedoras al presentar y preservar mejor sus propiedades fisicoquímicas y antioxidantes, tonalidades más rojizas y también fueron las únicas con capacidad antimicrobiana contra los tres patógenos evaluados. Los resultados obtenidos sugirieron que el uso de extracto de jamaica puede incrementar las propiedades del jugo de granada, fruta con buena aceptación en el mercado. La formulación 30:70 (jugo de granada: extracto de jamaica) podría ser una alternativa ideal para el desarrollo de productos funcionales, aprovechando las propiedades de ambos ingredientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto con clave 20677.24-PD denominado Evaluación de las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de microencapsulados de jugo de granada adicionado con jamaica, en la convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2024, de los Institutos Tecnológicos Descentralizados. Además, a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por todas las facilidades de infraestructura usadas en el desarrollo experimental del proyecto.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

AACC, (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, (11 th Ed.), Vol II, American Association of Cereal Chemists, St. Paul. [En línea]. Disponible en: <https://www.cereals-grains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx>. Fecha de consulta: 6 de enero de 2025.

Álvarez-Cervantes, P., Cancino-Díaz, J. C., Fabela-Illescas, H. E., Cariño-Cortés, R., López-Villagas, E. O., Ariza-Ortega, J. A., Belefant-Miller, H., &

Betanzos-Cabrera, G. (2021). Spray-drying microencapsulation of pomegranate juice increases its antioxidant activity after *in vitro* digestion. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 5089-5096. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15093>

Archaina, D., Vasile, F., Guzmán, J. J., Alamilla, L., & Carolina, B. (2019). Physical and functional properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract spray dried with maltodextrin-gum arabic

mixtures. *May*, 1-9. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14065>

Betanzos-Cabrera, G., Montes-Rubio, P. Y., Fabela-Illescas, H. E., Belefant-Miller, H., Cancino-Diaz, J. C., Montes-Rubio, P. Y., & Fabela-Illescas, H. E. (2015). Antibacterial activity of fresh pomegranate juice against clinical strains of *Staphylococcus epidermidis*. *Food & Nutrition Research*, 59(1), 276-280. <https://doi.org/10.3402/fnr.v59.27620>

Borrás-Linares, I., Fernández-Arroyo, S., Arráez-Roman, D., Palmeros-Suárez, P. A., Del-Val-Díaz, R., Andrade-González, I., Fernández-Gutiérrez, A., Gómez-Leyva, J. F., & Segura-Carretero, A. (2015). Characterization of phenolic compounds, anthocyanidin, antioxidant and antimicrobial activity of 25 varieties of Mexican Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 69, 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.053> <https://doi.org/10.32870/rmip.vi.552>

Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2(4), 426-442. <https://doi.org/10.1002/fft2.94>

Daza, L. D., Fujita, A., Fávaro-Trindade, C. S., Rodrigues-Ract, J. N., Granato, D., & Genovese, M. I. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 97, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.10.001>

Dhakal, S. P. & He, J. (2020). Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review. *Food Research International*, 137, 109326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109326>

Díaz-López, A. C., Villa-Cruz, V. y Vela-Gutiérrez, G. (2023). Viabilidad de bacterias ácido lácticas microencapsuladas mediante secado por aspersión con almidón de malanga en dos suplementos alimenticios. *CienciaUAT*, 18(2), 145-154. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v18i2.1804>

Haidari, M., Ali, M., Ward Casscells, S., & Majid, M. (2009). Pomegranate (*Punica granatum*) purified polyphenol extract inhibits influenza virus and has a synergistic effect with oseltamivir. *Phytomedicine*, 16(12), 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2009.06.002>

Hernández-López, Z., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Cadena-Ramírez,

A., Acevedo-Sandoval, O. A., Gordillo-Martínez, A. J., & Falfán-Cortés, R. N. (2018). Optimization of a spray-drying process for the production of maximally viable microencapsulated *Lactobacillus pentosus* using a mixture of starch-pulque as wall material. *Lwt*, 95, 216-222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.075>

Izquierdo-Vega, J. A., Arteaga-Badillo, D. A., Sánchez-Gutiérrez, M., Morales-González, J. A., Vargas-Mendoza, N., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Delgado-Olivares, L., Madrigal-Bujaidar, E., & Madrigal-Santillán, E. (2020). Organic acids from Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.)-A brief review of its pharmacological effects. *Biomedicine*, 8(5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES8050100>

Jafari, S. M., Ghalegi-Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.070>

Jiménez-González, O. & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2021). Extraction, microencapsulation, color properties, and experimental design of natural pigments obtained by spray drying. *In Food Engineering Reviews*, 13(4), 769-811. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09288-7>

Khajebishak, Y., Payahoo, L., Alivand, M., Hamishehkar, H., Mobasser, M., Ebrahimzadeh, V., Alipour, M., & Alipour, B. (2019). Effect of pomegranate seed oil supplementation on the GLUT-4 gene expression and glycemic control in obese people with type 2 diabetes: A randomized controlled clinical trial. *Journal of Cellular Physiology*, 234(11), 19621-19628. <https://doi.org/10.1002/jcp.28561>

Maciel, L. G., do-Carmo, M. A. V., Azevedo, L., Dagher, H., Molognoni, L., de-Almeida, M. M., Granato, D., & Rosso, N. D. (2018). *Hibiscus sabdariffa* anthocyanins-rich extract: Chemical stability, in vitro antioxidant and antiproliferative activities. *Food and Chemical Toxicology*, 113, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.01.053>

Marques, L. G., Ferreira, M. C., & Freire, J. T. (2007). Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.04.011>

Martínez-Ramírez, E. Z., González-Cruz, L.,

- Bernardino-Nicanor, A., Silva-Martínez, G. A., Falfan-Cortes, R. N., Gonzalez-Montiel, S., & Gomez-Aldapa, C. A. (2024). Hibiscus Acid Inhibitory Capacity of Angiotensin Converting Enzyme: an In Vitro and In Silico Study. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 234-241. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01142-5>
- Meneses-Marentes, N. A., Herrera-Ramírez, E. J., & Tarazona-Díaz, M. P. (2019). Characterization and stability of an extract rich in anthocyanins from passion purple fruit peel. *Revista Colombiana de Química*, 48(2), 27-32. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n2.76682>
- Mortada, W. I., Awadalla, A., Khater, S. M., Barakat, N. M., Husseiny, S. M., & Shokeir, A. A. (2020). Preventive effect of pomegranate juice against chemically induced bladder cancer: An experimental study. *Heliyon*, 6(10), e05192. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05192>
- Nguyen, Q. D., Dang, T. T., Nguyen, T. V. L., Nguyen, T. T. D., & Nguyen, N. N. (2022). Microencapsulation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) anthocyanins: Effects of different carriers on selected physicochemical properties and antioxidant activities of spray-dried and freeze-dried powder. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 359-374. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2044846>
- Ochoa-Reyes, E., Guevara-Aguilar, A. y Tirado-Gallegos, J. M. (2022). Adición de extracto de cáscara de granada en un alimento tradicional mexicano y evaluación de la estabilidad al procesado. *Universitas Agri*, 1 (1): 18
- Ozkan, G., Franco, P., De-Marco, I., Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272: 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Portillo-Torres, L. A., Bernardino-Nicanor, A., Gómez-Aldapa, C. A., González-Montiel, S., Rangel-Vargas, E., Villagómez-Ibarra, J. R., González-Cruz, L., Cortés-López, H., & Castro-Rosas, J. (2019). Hibiscus acid and chromatographic fractions from *Hibiscus sabdariffa* calyces: Antimicrobial activity against multidrug-resistant pathogenic bacteria. *Antibiotics*, 8(4), 1-18. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040218>
- Rangel-Vargas, E., Gómez-Aldapa, C. A., Falfan-Cortes, R. N., Rodríguez-Marín, M. L., Godínez-Oviedo, A., Acevedo-Sandoval, O. A., & Castro-Rosas, J. (2017). Attachment of 13 types of foodborne bacteria to Jalapeño and Serrano peppers and antibacterial effect of roselle calyx extracts, sodium hypochlorite, colloidal silver, and acetic acid against these foodborne bacteria on peppers. *Journal of Food Protection*, 80(3), 406-413. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-269>
- Reyes, V., Chotiko, A., Chouljenko, A., & Sathivel, S. (2018). Viability of *Lactobacillus acidophilus* NRRL B-4495 encapsulated with high maize starch, maltodextrin, and gum arabic. *Lwt*, 96, 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.017>
- Rezende, Y. R. R. S., Nogueira, J. P., & Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>
- Ribeiro, A. M., Shahgol, M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2020). Microencapsulation of Vitamin A by spray-drying, using binary and ternary blends of gum arabic, starch and maltodextrin. *Food Hydrocolloids*, 108, 106029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106029>
- Rodríguez, O., Cardoso, F., González, J., Íñiguez, C. y Núñez, M. (2017). Temperaturas de secado para la microencapsulación de saborizantes frutales mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 27(3), 1-6.
- Tatasciore, S., Santarelli, V., Neri, L., Di-Mattia, C. D., Di-Michele, A., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2024). Microencapsulation of hop bioactive compounds by spray drying: Role of inlet temperature and wall material. *Current Research in Food Science*, 8. 100769 <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100769>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88(3), 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food*

Research International, 43(3), 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>

Türkyılmaz, M., Hamzaoglu, F., Çiftci, R. B. A., & Özkan, M. (2023). Increase in colour stability of pomegranate juice against 5-hydroxymethylfurfural (HMF) through copigmentation with phenolic acids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7836–7848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12866>

Vargas-León, E. A., Díaz-Batalla, L., González-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Castro-Rosas, J., Reynoso-Camacho, R., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018). Effects of acid hydrolysis on the free radical scavenging capacity and inhibitory activity of the angiotensin converting enzyme of phenolic compounds of two varieties of Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 116, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.044>

Ye, Q., Georges, N., & Selomulya, C. (2018). Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products. *Trends in Food Science and Technology*, 78, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.025>