



SOCIBI
Sociedad Científica Internacional
de Biotecnólogos A.C.

World Journal of Bioscience and Biotechnology 2025, 1 (1):1-18

Journal homepage: <https://socibiotech.com/journals/wjbb>



ORIGINAL RESEARCH

ISSN: 3061-8185



Encapsulation of antioxidants extracted from turmeric (*Cúrcuma longa L*) by the electrospinning method

Encapsulación de antioxidantes extraídos de cúrcuma (*Cúrcuma longa L*) por el método de electrohilado

José María Fernández-Luna¹, Verónica Santacruz-Vázquez¹, Santa Toxqui-López², José Luis Córdova-de la Luz³, Claudia Santacruz-Vázquez*¹ 

¹Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México.

²Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México.

³Instituto de Fisiología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Prol. de la 14 Sur 6301, Cd. Universitaria, 72592 Puebla, Puebla, México.

*Corresponding author

E-mail address: clausanva@yahoo.com.mx (Santacruz-Vázquez)

ABSTRACT

Antioxidant compounds (curcuminoids) extracted from *Curcuma longa L.* were encapsulated by electrospinning, using aluminum foil and glass slides as collectors. Curcuminoids were extracted with ethanol and incorporated into two emulsions: a 10% polyvinyl alcohol (PVA) emulsion with curcumin (E1), and a 10% PVA emulsion with curcumin and 2% glacial acetic acid (GAA) (E2). Scanning electron microscopy revealed that the E1 emulsion microfibers exhibited better encapsulation and smaller diameters (0.485 μm) compared to those made with the

E2 emulsion (0.897 μm), which showed structural defects. Confocal microscopy analysis confirmed the fluorescence of E1 microfibers at 405, 488, and 561 nm, indicating a homogeneous distribution of curcumin and improved encapsulation of antioxidants. The antioxidant activity of the E1 microfibers showed a 50% reduction in peroxide formation compared to traditional packaging. These findings contribute to the development of active packaging based on natural antioxidant compounds as an alternative to conventional materials.

Keywords: antioxidants, electrospinning, encapsulations, microfiber, nanotechnology, turmeric.

RESUMEN

Se encapsularon compuestos antioxidantes (curcuminoides) extraídos de *Cúrcuma longa* L. mediante electrohilado, utilizando papel aluminio y portaobjetos de vidrio como colectores. Los curcuminoides fueron extraídos con etanol y utilizados en dos emulsiones: Emulsión con alcohol polivinílico (PVA) al 10% con curcumina (E1) y emulsión con PVA al 10% con curcumina y 2% de ácido acético glacial (AAG) (E2). La microscopía electrónica de barrido mostró que las microfibras de la emulsión E1 tenían una mejor encapsulación y un menor diámetro (0.485 μm) comparadas con las microfibras elaboradas con la emulsión E2 (0.897 μm), estas últimas presentaron defectos estructurales. El análisis mediante

microscopía confocal confirmó la fluorescencia de las microfibras E1 a 405, 488 y 561 nm, evidenciando una distribución homogénea de la curcumina y una optimización en la encapsulación de antioxidantes. La actividad antioxidante de las microfibras obtenidas E1, presentaron una reducción del 50 % en la formación de peróxidos, comparado con el empaque tradicional. Estos hallazgos contribuyen al desarrollo de empaques activos basados en compuestos antioxidantes naturales como alternativa de uso a los materiales convencionales.

Palabras clave: antioxidantes, cúrcuma, electrohilado, encapsulación, microfibras, nanotecnología.

Received: 5 January 2025 / Received in revised form: 20 February 2025 / Accepted: 25 February 2025 / Published online: 28 February 2025.
<https://doi.org/10.29267/wjbb.2025.1.1.1-18>

1. Introducción

La creciente necesidad de desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles para la conservación de alimentos ha impulsado la búsqueda de alternativas que no solo protejan los productos alimenticios, sino que también sean respetuosas con el medio ambiente y saludables para los consumidores. Los métodos tradicionales de empaque, aunque efectivos en algunos aspectos, a menudo no son suficientes para proteger los alimentos de factores como la oxidación, el deterioro microbiológico y la pérdida de nutrientes, lo que afecta la calidad y vida útil de los mismos (Vanderroost *et al.*, 2014). Esta deficiencia ha generado un creciente interés en la búsqueda de empaques activos que puedan responder a estas limitaciones y proporcionar una mayor protección a los alimentos a lo largo de su ciclo de vida (Kehinde *et al.*, 2020). En este contexto, el electrohilado, también conocido como electrospinning, ha surgido como una tecnología innovadora con un gran potencial en la creación de **micro y nanofibras** a partir de soluciones poliméricas. Este proceso permite obtener estructuras fibrosas extremadamente finas, que pueden ser utilizadas en la fabricación de empaques activos (Khan *et al.*, 2021). Las microfibras generadas mediante electrohilado presentan varias ventajas, como una mayor área superficial, lo que mejorará la capacidad de liberar compuestos funcionales de manera controlada como antioxidantes, antimicrobianos o incluso agentes aromatizantes. Esto hace que los empaques sean más eficientes en la preservación de las propiedades sensoriales y nutricionales de los alimentos, mejorando la calidad y la vida útil sin la necesidad de conservadores sintéticos (Zhang *et al.*, 2022).

Uno de los compuestos que ha despertado un interés considerable en este campo es la **curcumina**, un curcuminóide presente en la raíz de ***Cúrcuma longa L.***, planta originaria del sudeste asiático conocida por sus propiedades medicinales y antioxidantes (Mesa *et al.*, 2000). La cúrcuma ha sido utilizada tradicionalmente en la industria, no solo como colorante y condimento, sino también por su capacidad para prevenir la oxidación y el deterioro de los alimentos (Ríos *et al.*, 2009) ya que al ser un potente antioxidante, capaz de neutralizar los radicales libres y proteger las grasas y aceites de la oxidación, lo que la convierte en un candidato ideal para ser incorporado en sistemas de empaque (Jayaprakasha *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2011; Bengmark *et al.*, 2009).

La incorporación de curcumina en microfibras obtenidas mediante la técnica de electrohilado permite su encapsulación y liberación controlada, favoreciendo su eficacia antioxidante en los empaques alimentarios. Este método mejora la estabilidad de la curcumina al prevenir su degradación prematura y garantizar una acción prolongada (Ravindran *et al.*, 2007). Los empaques elaborados con estas microfibras no solo funcionan como barreras físicas que protegen los alimentos de factores externos, sino que también liberan de manera gradual los compuestos antioxidantes proporcionando una protección adicional frente a la oxidación lipídica y el crecimiento microbiano, lo que prolonga significativamente la vida útil de los productos alimenticios, tanto de origen vegetal como animal (Duan *et al.*, 2023). Los curcuminóides extraídos de la cúrcuma han sido ampliamente estudiados a nivel mundial mediante diversos métodos de extracción, como maceración-agitación, molienda-agitación y extracción asistida por microondas (MWHD) (Mandal *et al.*, 2008). Asimismo, se han empleado técnicas de cromatografía en capa delgada y cromatografía en columna (Péret *et al.*, 2005), así como

cromatografía líquida de alta resolución (Jiang *et al.*, 2006) para identificar, separar y cuantificar los curcuminoides. Por su parte, Ni *et al.* (2009) analizaron distintos extractos obtenidos con solventes como etanol, metanol y hexano para identificar sus principios activos, evaluar sus actividades biológicas, optimizar su acción y comprender sus mecanismos de funcionamiento (Nwoso *et al.*, 2009; Green *et al.*, 2010).

El objetivo de esta investigación fue determinar la actividad antioxidante y el potencial de las microfibras encapsuladas con curcumina mediante la técnica de electrohilado, así como determinar el grado de oxidación de las grasas mediante el método del índice de peróxidos. Para ello, se utilizó como sustrato de oxidación un producto de confitería elaborado con almendras y sacarosa, cuya estabilidad se comparó con la de un empaque tradicional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material biológico

La cúrcuma de raíz (*Cúrcuma longa L.*), fue adquirida en el Mercado Hidalgo, de la Ciudad de Puebla de Zaragoza, México.

2.2. Extracción de la curcumina

La raíz fue lavada y para la extracción de la curcumina, se realizaron una serie de diluciones con etanol, las cuales consistieron en sumergir los fragmentos de cúrcuma en etanol (40:60 m/v) y homogeneizarlos manualmente durante un minuto.

2.3. Preparación del alcohol polivinílico y emulsiones a electrohilar

Una vez obtenido el extracto de cúrcuma (curcumina), se procedió a la preparación de alcohol polivinílico (PVA) de alta densidad, grado técnico e hidrolizado al 87%, de la marca Meyer. Se pesaron 10 gramos de PVA y se adicionaron en 90 ml de agua destilada y homogeneizó utilizando un agitador magnético con placa calefactora IKA modelo C-MAG HS7 durante 4 horas. Una vez obtenido el PVA al 10%, se mezcló con el extracto de cúrcuma, obteniéndose dos emulsiones: E1 con relación 1:1, compuesta de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol y E2 con relación 1:1:1, compuesta de PVA al 10%, extracto de cúrcuma con etanol y ácido acético glacial al 2%.

2.4. Elaboración de microfibras por el método de electrohilado

Las emulsiones se vertieron en el cilindro del sistema de inyección del equipo de electrohilado de la marca ESPIN-50 kV a temperatura ambiente, considerando la humedad relativa, el voltaje suministrado al equipo, la velocidad del rotor y la distancia del sistema de inyección-rotor. En el rotor se colocó como soporte el papel aluminio y el portaobjetos de vidrio para coleccionar las microfibras. La formación de microfibras y la encapsulación de curcumina se realizó bajo las siguientes condiciones operativas: temperatura de 22 °C, humedad relativa del 57%, tiempo de operación de 30 minutos, voltaje de 25 kV, velocidad del rotor de 509 rpm y distancia entre el sistema de inyección-rotor de 21 cm.

2.5. Análisis de las microfibras con curcumina

2.5.1. Análisis de las microfibras obtenidas por microscopía de campo claro

Las microfibras fueron analizadas y observadas con un microscopio de campo claro Olympus BX53, utilizando un aumento de 100x, con ajuste de iluminación de una lámpara de luz ultravioleta para optimizar la visibilidad de la estructura de las microfibras.

2.5.2. Análisis de las microfibras a través de microscopía electrónica de barrido

El microscopio que se empleó para la caracterización es un MEB de bajo vacío, modelo JMS-53000 con una diferencia de potencial de 20 kV, detectando electrones retro-dispersados y en ampliaciones de 1000, 5000 y 10,000 X.

2.5.3. Análisis de las microfibras a través del software Image J

La caracterización de microfibras se realizó mediante el software Image J versión 2018, el cual es un software de código abierto desarrollado por el *National Institutes of Health (NIH)* de EE. UU., para el procesamiento y análisis de imágenes científicas. El análisis de las microfibras implica una serie de pasos que permiten analizar y cuantificar el diámetro de éstas. Para ello las micrografías obtenidas en el MEB, fueron capturadas, convertidas a escala de grises y analizadas mediante el plugin análisis de partículas.

2.5.4. Análisis de las microfibras a través del microscopio confocal

Las microfibras obtenidas fueron analizadas utilizando un microscopio confocal de barrido láser LSM 900 de ZEISS, con capacidad de excitación en distintas longitudes de onda. Para ello, las muestras se expusieron a láseres específicos que permitieron la excitación de los fluoróforos presentes en la curcumina encapsulada. Se registraron imágenes en diferentes canales de emisión para evaluar la distribución y la intensidad de fluorescencia de la curcumina dentro de las microfibras. Esto permitió determinar la eficiencia de encapsulación y la homogeneidad de la dispersión del compuesto en la estructura de las microfibras.

El análisis de las microfibras se llevó a cabo sin excitación de luz, utilizando un bucle espectral DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol), un fluorocromo ampliamente utilizado en microscopía de fluorescencia, que produce excitación en un rango de 350-360 nm (UV) y emisión a 450-460 nm (azul). También se utilizó un bucle espectral FITC (Fluoresceína IsoTiocianato), el cual es un fluoróforo con un rango de excitación de 488-495 nm y rango de emisión de 515-520 nm (verde). Finalmente, se empleó un bucle espectral Rhodamine Red-X, un fluoróforo que produce excitación en un rango de 540-570 nm y emisión de 590-610 nm (rojo oscuro) (Bestvater *et al.*, 2002).

Para la obtención de las imágenes en formato JPG, se utilizó el software NIS-Elements Viewer, empleando la función vista de volumen con renderizado 3D, la Vista de mosaico para conjuntos de datos de tiempo, Z y multipunto y la vista de corte para conjuntos de datos Z. Estas herramientas permitieron analizar la estructura tridimensional de las microfibras, así como su distribución y fluorescencia en distintas posiciones.

2.6. Medición del potencial antioxidante de las microfibras con curcumina

El ensayo para evaluar la oxidación se llevó a cabo mediante la determinación del índice de peróxidos, utilizando como matriz oxidante un producto de confitería a base de almendras y sacarosa. Se compararon bajo las mismas condiciones de almacenamiento a 25°C, un producto con empaque tradicional y otro con empaque elaborado a partir de microfibras electrohiladas con curcumina. Ambos empaques conteniendo el producto de confitería, fueron almacenados

durante 30, 60 y 90 días. La evaluación de la rancidez se realizó de acuerdo con la norma NMX-F-154-SCFI-2010 (Alimentos. Aceites y grasas vegetales o animales). Para ello, se tomaron 5 ml de muestra y se añadieron 30 ml de ácido acético y cloroformo. La mezcla se agitó hasta su disolución y posteriormente se le incorporaron 0.5 ml de solución saturada de yoduro de potasio, agitando durante 1 minuto. Luego, se añadieron 30 ml de agua destilada y se agitó nuevamente. A la solución resultante se le agregaron 1 ml de solución indicadora de almidón al 1% y se tituló con una solución de tiosulfato de sodio al 0.01 N hasta observar el cambio de color de azul a incoloro. La determinación de los miliequivalentes de peróxidos en las muestras se calculó con base en la relación entre el consumo de tiosulfato de sodio y su normalidad (Ec. 1).

$$\frac{\text{Miliequivalentes}}{\text{Kg}} \text{ Peróxido} = \frac{(\text{Consumo de Tiosulfato de Sodio}) (\text{N Tiosulfato de sodio})}{\text{Peso de muestra}} * 1000 \quad (\text{Ec.1})$$

3. RESULTADOS

3.1. Condiciones de operación para la obtención de microfibras con curcumina

La formación de microfibras y la encapsulación de curcumina mediante el método de electrohilado fueron óptimas para ambas emulsiones E1 compuesta de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 y E2 compuestas de PVA al 10%, extracto de cúrcuma con etanol y ácido acético glacial (AAG) al 2% en proporción 1:1:1. El objetivo en el proceso de electrohilado, fue generar el cono de Taylor de manera correcta, evitar el escurrimiento en la salida del sistema de inyección y garantizar que las microfibras se depositaran completamente en el colector. Las observaciones mediante microscopía de campo claro de las microfibras obtenidas, utilizando un colector de vidrio, revelaron la presencia de curcumina, evidenciada por una emisión de luz (Fig. 1) cuando las microfibras fueron sometidas a una excitación con una longitud de onda de 460 nm.

3.2. Análisis de las microfibras obtenidas por microscopía electrónica de barrido

Mediante microscopía electrónica de barrido se observó la superficie de las microfibras obtenidas mediante el proceso del electrohilado, utilizando papel aluminio. Las microfibras elaboradas con etanol como disolvente, sin la adición de AAG, presentaron una mejor uniformidad (Fig. 2a) en comparación con las microfibras a la que se le adicionó AAG (Fig. 2b), donde se observó un ensanchamiento de las microfibras.

El uso de la microscopía electrónica de barrido no permitió identificar la presencia de curcumina en la microfibra obtenida, esto debido a que el uso de dicha microscopía solo brinda información sobre la topografía, composición y contraste de materiales, más no sobre la presencia de la curcumina en el interior de la microfibra.



Fig. 1. Micrografía en campo claro de las microfibras compuestas de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 (E1), excitada a una longitud de onda de 460 nm

Fig. 1. Bright-field micrograph of microfibers composed of 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio (E1), excited at a wavelength of 460 nm.

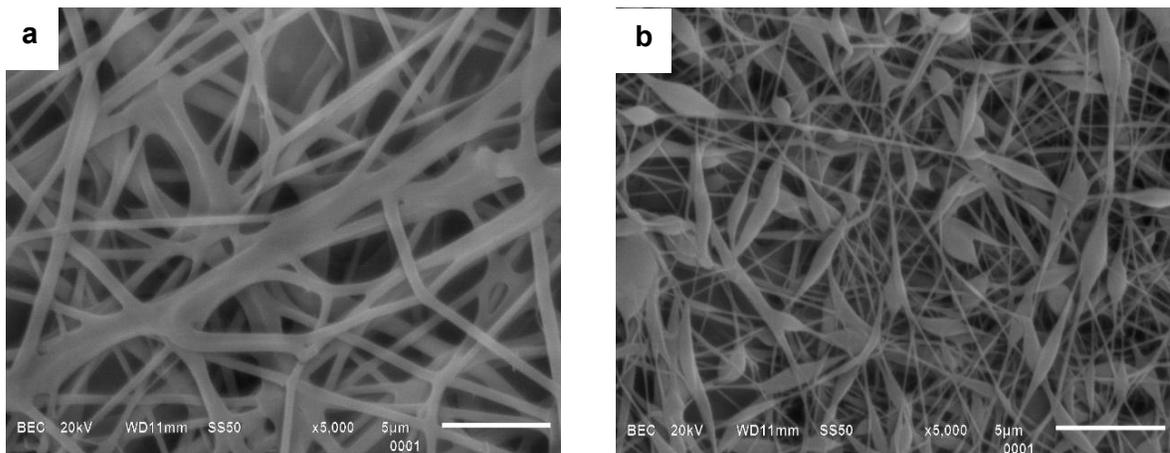


Fig. 2. Observación microscópica en MEB de microfibras compuestas de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 a 5000X (a) y microfibras compuestas de PVA al 10%, extracto de cúrcuma con etanol y ácido acético glacial al 2% en proporción 1:1:1 a 5000X (b).

Fig. 2. SEM micrograph of microfibers composed of 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio at 5000X (a), and microfibers composed of 10% PVA, turmeric extract with ethanol, and 2% glacial acetic acid in a 1:1:1 ratio at 5000X (b).

3.3. Determinación del diámetro de microfibras por análisis de imagen

Mediante el software Image J, versión 2018, se realizó la medición longitudinal de las microfibras para determinar su diámetro (Tabla 1). Se observó que la muestra del tratamiento E1 presentó un diámetro promedio menor en comparación con las muestras del tratamiento E2, donde se evidenció la presencia de abultamientos o ensanchamiento de las microfibras debido al uso de AAG. La presencia de dichos abultamientos en la fibra representa un defecto en la misma debido a la poca homogeneidad de la microfibra.

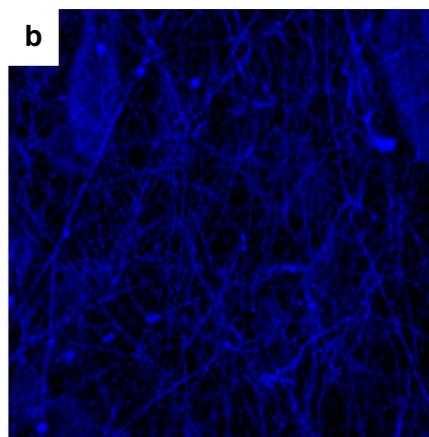
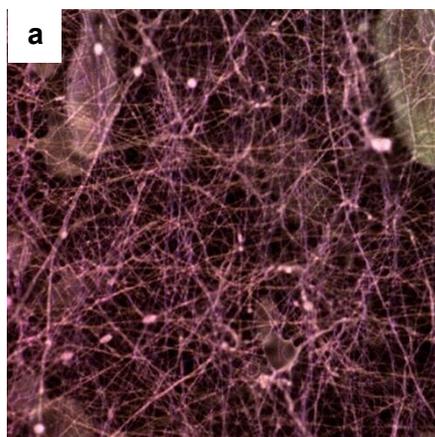
Tabla 1. Medidas de las microfibras a través del Software Image J.

Table 1. Measurements of microfibrers using ImageJ software.

Muestra	E1	E2
Promedio (μm)	0.485	0.897
Desviación Estándar. (μm)	0.125	0.295
Mínimo (μm)	0.321	0.502
Máximo (μm)	0.753	1.877

3.4. Análisis de microfibras obtenidas por microscopía confocal

Las imágenes obtenidas mediante microscopía confocal mostraron que las microfibras de la formulación E1 emitieron fluorescencia en respuesta a la excitación, mientras que las microfibras de la formulación E2 no presentaron fluorescencia ante la excitación con luz ultravioleta en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Las condiciones específicas del análisis en el microscopio confocal fueron las siguientes: calibración ($\mu\text{m}/\text{px}$) = 0.16, óptica: Plan Apo λ 20x. La calibración (0.16 $\mu\text{m}/\text{px}$) permite realizar mediciones precisas en la imagen adquirida, y la lente Plan Apo λ 20x garantiza alta resolución y fidelidad cromática, lo que es crucial para estudios detallados de estructuras de materiales.



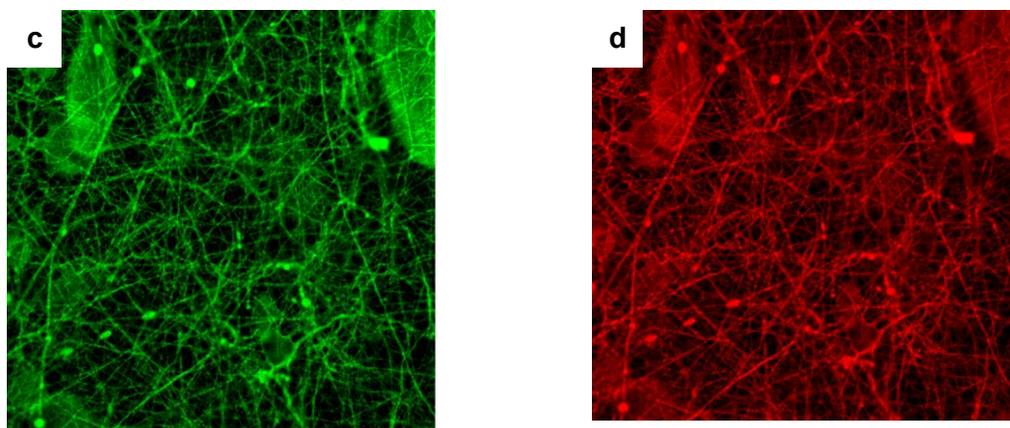


Fig. 3. Micrográficas de confocal que muestran diferentes microfibras compuestas: PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 sin excitación de luz (a), PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1, con capacidad de emitir fluorescencia en el bucle espectral DAPI (b), PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1, con capacidad de emitir fluorescencia en el bucle espectral FITC (c), PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1, con capacidad de emitir fluorescencia en el bucle espectral Rhodamine Red-X (d).

Fig. 3. Confocal micrographs of different microfibers composed as follows: 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio without light excitation (a), 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio, exhibiting fluorescence in the DAPI spectral channel (b), 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio, exhibiting fluorescence in the FITC spectral channel (c), and 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio, exhibiting fluorescence in the Rhodamine Red-X spectral channel (d).

El análisis mediante microscopía confocal de las microfibras obtenidas sin excitación previa de la muestra permitió la reconstrucción tridimensional de las microfibras y la detección de curcumina en su estructura (Fig. 3a). A diferencia de otros métodos, la microscopía confocal utiliza láseres de diferentes longitudes de onda para excitar fluoróforos en la muestra. Los fluoróforos (curcumina) absorben la luz láser y luego emiten luz de mayor longitud de onda. Las microfibras respondieron a la excitación en el espectro de luz ultravioleta a 405 nm (Fig. 3b), 488 nm (Fig. 3c) y 561 nm (Fig. 3d), confirmando la presencia de curcumina. Esto validó la eficiencia del proceso de encapsulación y reveló la distribución interna del compuesto en la microfibra.

A partir del análisis de microscopía confocal es posible observar que la curcumina es un polifenol con un sistema de enlaces conjugados que le permite absorber luz en ciertas longitudes de onda y emitir fluorescencia. A una longitud de onda de excitación entre 405 y 488 nm y emisión entre 500 y 561 nm. Estas propiedades la hacen detectable en microscopía confocal de fluorescencia sin necesidad de marcadores cromáticos adicionales.

Otra de las ventajas del microscopio confocal es realizar Z-stack para obtener imágenes en diferentes planos de profundidad dentro de una muestra (Fig.4). Esto se debe a que la microscopía confocal permite la adquisición de imágenes ópticamente seccionadas a distintos niveles de profundidad, lo que ofrece ventajas clave en la microscopía tridimensional. Por lo que las muestras electrohiladas soportadas en el portaobjetos de vidrio fueron analizadas mediante microscopía confocal con un aumento de 20x. Se realizó un escaneo en z-stack, lo que permitió visualizar la distribución tridimensional de la curcumina en toda la microfibras a diferentes profundidades de penetración (Fig. 5) y verificar su encapsulación de manera más detallada.

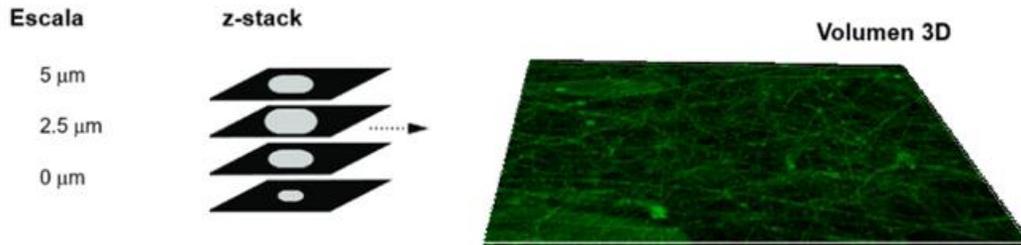
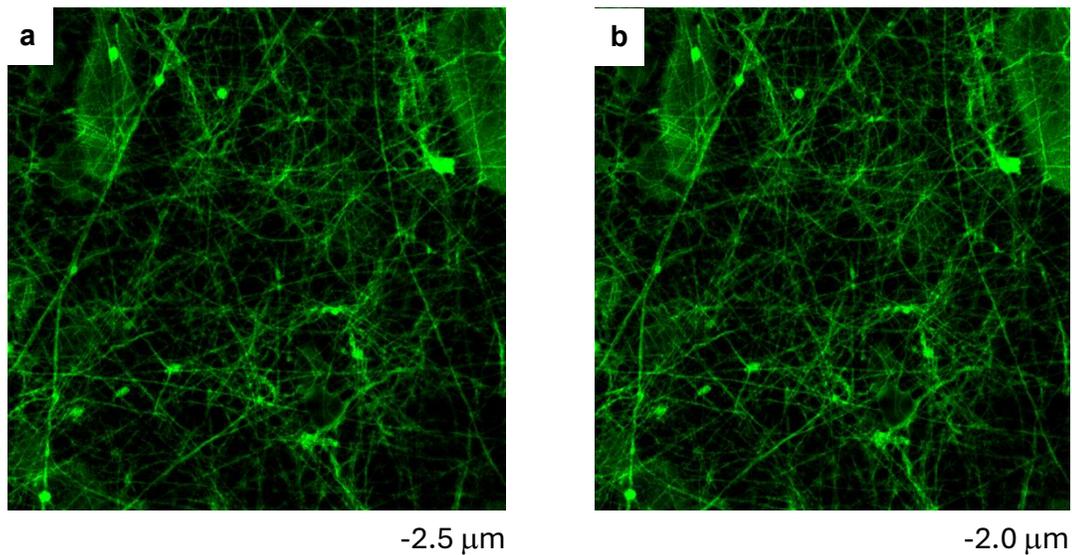
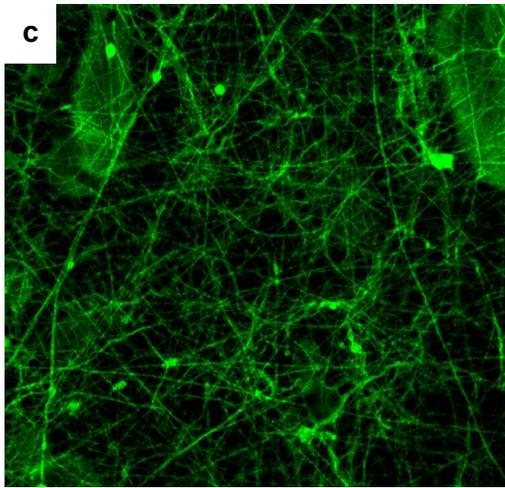


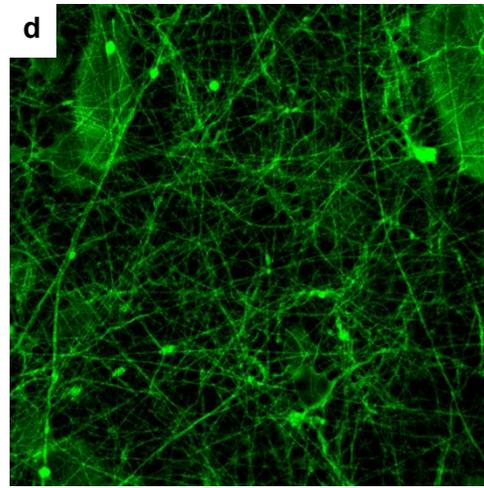
Fig. 4. Diagrama de la estructura z-stack de las microfibras en el plano tridimensional

Fig. 4. Diagram of the z-stack structure of the microfibers in the three-dimensional plane.

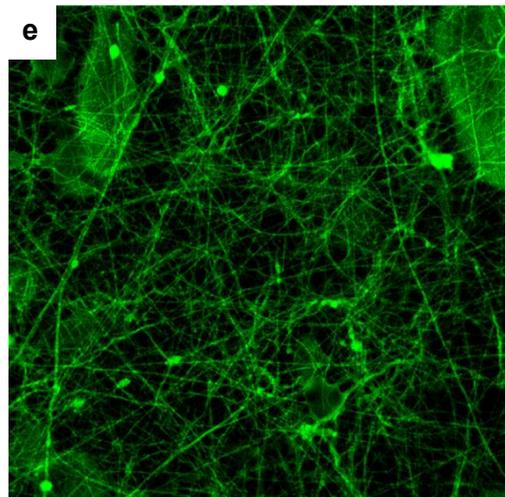




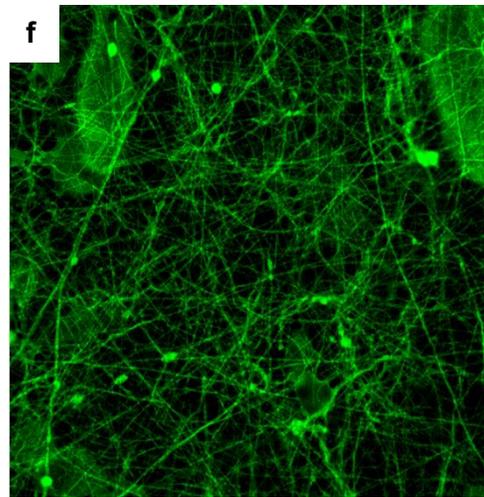
-1.5 μm



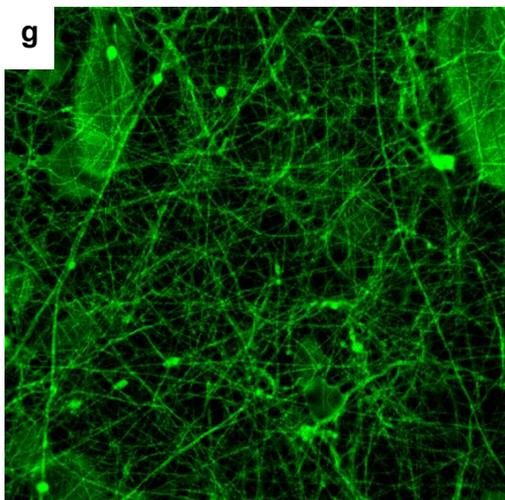
-1.0 μm



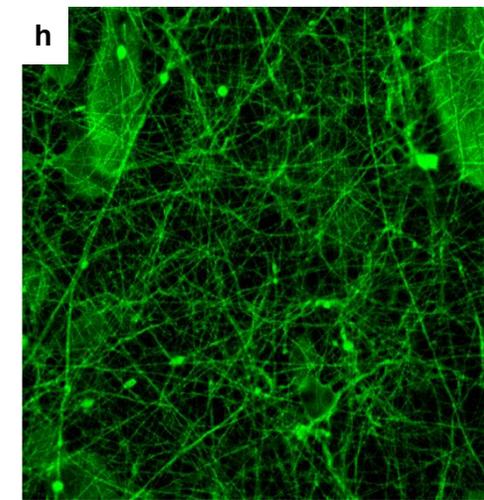
-0.5 μm



0.0 μm



0.5 μm



1.0 μm

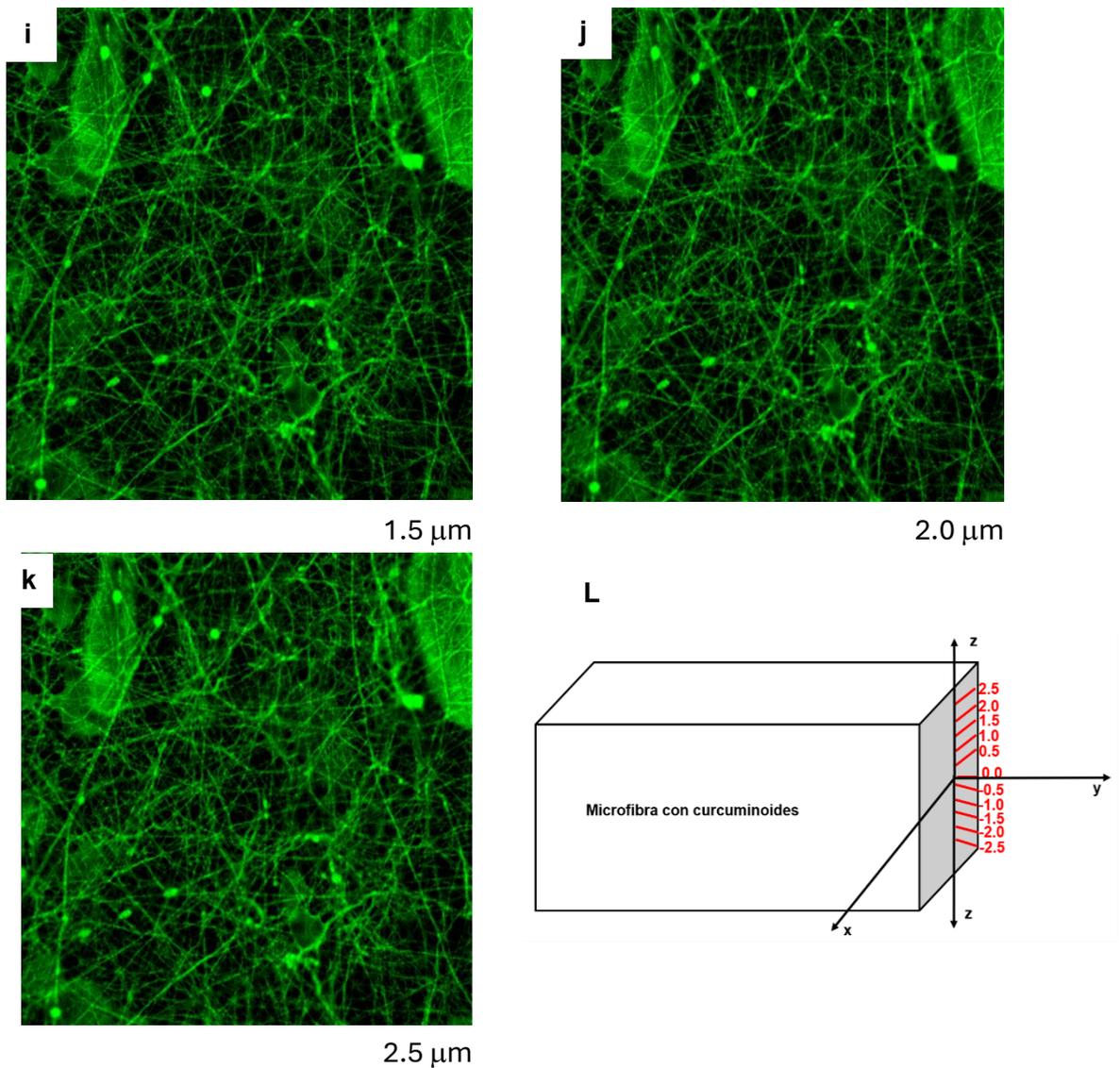


Fig. 5. Análisis de la estructura z-stack de las microfibras compuestas de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1. Las micrografías (a) a (k) corresponden a diferentes profundidades del eje Z de las microfibras, detallando la encapsulación de la curcumina en las siguientes posiciones (en μm). Micrografía a $-2.5 \mu\text{m}$ (a), micrografía a $-2 \mu\text{m}$ (b), micrografía a $-1.5 \mu\text{m}$ (c), micrografía a $-1 \mu\text{m}$ (d), micrografía a $-0.5 \mu\text{m}$ (e), micrografía a $0.0 \mu\text{m}$ (f), micrografía a $0.5 \mu\text{m}$ (g), micrografía a $1.0 \mu\text{m}$ (h), micrografía a $1.5 \mu\text{m}$ (i), micrografía a $2.0 \mu\text{m}$ (j) micrografía a $2.5 \mu\text{m}$ (k). El diagrama (L) representa la escala utilizada para la medición de las profundidades.

Fig. 5. Analysis of the z-stack structure of microfibers composed of 10% PVA and turmeric extract with ethanol in a 1:1 ratio. Micrographs (a) to (k) correspond to different depths along the Z-axis of the microfibers, detailing the encapsulation of curcumin at the following positions (in μm): Micrograph at $-2.5 \mu\text{m}$ (a), micrograph at $-2 \mu\text{m}$ (b), micrograph at $-1.5 \mu\text{m}$ (c), micrograph

at $-1 \mu\text{m}$ (d), micrograph at $-0.5 \mu\text{m}$ (e), micrograph at $0.0 \mu\text{m}$ (f), micrograph at $0.5 \mu\text{m}$ (g), micrograph at $1.0 \mu\text{m}$ (h), micrograph at $1.5 \mu\text{m}$ (i), micrograph at $2.0 \mu\text{m}$ (j), and micrograph at $2.5 \mu\text{m}$ (k). Diagram (L) represents the scale used for depth measurement.

3.5. Potencial antioxidante de las microfibras con curcumina para empaque activo

Además de obtener microfibras mediante la técnica de electrohilado, de analizar su morfología y la disposición de la curcumina encapsulada dentro de ellas. Se evaluó su potencial antioxidante con el objetivo de determinar su viabilidad como alternativa de empaque para productos susceptibles al enranciamiento, utilizando como modelo de prueba un producto de confitería a base de almendras y sacarosa.

Como se observa en la Figura 6, después de 30 días de almacenamiento, el empaque tradicional presentó un índice de peróxidos de 24 miliequivalentes, un valor significativamente alto en comparación con el empaque elaborado con las microfibras compuesta de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 (E1), cuyo índice fue de 11 miliequivalentes, lo que representa una reducción del 50 % en la formación de peróxidos.

A los 60 días de almacenamiento, el empaque tradicional registró 8 miliequivalentes de peróxidos, mientras que el empaque con microfibras compuestas de PVA al 10% y extracto de cúrcuma con etanol en proporción 1:1 (E1), mostró un valor de 6 miliequivalentes. Finalmente, a los 90 días de almacenamiento, la diferencia entre ambos empaques fue del 8 %, lo que indica que las microfibras con curcumina contribuyeron a reducir la oxidación del producto empacado.

Estos resultados representan una contribución científica al desarrollo de empaques alimentarios, evidenciando el potencial de las microfibras encapsuladas con curcumina para prolongar la estabilidad oxidativa de los alimentos.

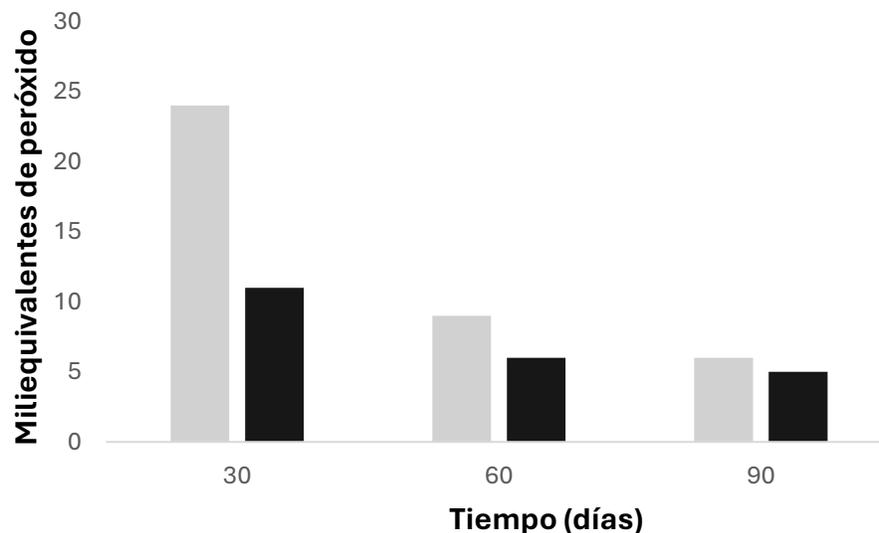


Fig. 6. Miliequivalentes de peróxidos producidos en 30, 60 y 90 días de almacenamiento de los productos evaluados, comparando la estabilidad oxidativa de los productos en presencia de microfibras (barras negras) de curcumina y un empaque convencional (barras grises).

Fig. 6. Milliequivalents of peroxides produced after 30, 60, and 90 days of storage in the evaluated products, comparing the oxidative stability of the products in the presence of curcumin microfibers (black bars) and conventional packaging (gray bars).

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la selección del disolvente para la extracción de curcumina indicaron que el etanol fue el más eficiente. Este fenómeno se atribuye a la polaridad de los curcuminoides, lo que sugiere una mayor afinidad de estos compuestos hacia el etanol en comparación con el agua (Ríos *et al.*, 2009). Dado que los curcuminoides presentes en la cúrcuma poseen estructuras con un elevado número de carbonos, su solubilidad es mayor en etanol puro que en agua, especialmente en concentraciones entre 76% y 96% (Centeno *et al.*, 2004). Estos hallazgos fundamentan el uso de etanol al 96% en las formulaciones E1 y E2.

El alcohol polivinílico, utilizado como polímero encapsulante de los extractos de cúrcuma, demostró ser efectivo en la preservación de las propiedades antioxidantes y en la protección de los curcuminoides frente a la fotodegradación. En contraste, otros sistemas como el ácido poliláctico y la combinación quitosano-xantano han mostrado menor estabilidad para estos compuestos, según lo señalado por Mitra, *et al.*, (2022).

La encapsulación de curcumina mediante electrohilado permitió obtener microfibras con una estructura homogénea y óptima, particularmente en la formulación de la emulsión E1. Sin embargo, la formulación E2, que incluía ácido acético glacial (AAG) como agente conductor, presentó defectos de ensanchamiento en las microfibras. Este comportamiento puede explicarse por alteraciones en la viscosidad y conductividad de la solución, lo que provocó escurrimiento en la salida del sistema de inyección e impidió la correcta formación de las microfibras, en concordancia con lo reportado por Moghe y Gupta (2008).

La curcumina, principal compuesto bioactivo de *Cúrcuma longa L.*, exhibe fluorescencia cuando es excitada con luz ultravioleta debido a su estructura química, que incluye grupos cromóforos y sistemas conjugados de electrones π . Estos sistemas permiten la absorción de luz en la región ultravioleta, excitando las moléculas a un estado de mayor energía. Al retornar al estado fundamental, la energía es liberada en forma de luz visible, generando fluorescencia (Sheikh *et al.*, 2018).

El análisis mediante microscopía confocal confirmó la fluorescencia de las microfibras con curcumina a longitudes de onda de 405, 488 y 561 nm, lo que valida la preservación de sus propiedades bioactivas. Este hallazgo es consistente con los resultados de Zhou *et al.*, (2011), quienes observaron que los curcuminoides pueden conservar sus propiedades ópticas tras procesos de encapsulación bajo un voltaje de 25 kV y una humedad relativa superior al 55%. Además, el menor diámetro promedio y la uniformidad de las microfibras de la formulación E1 (0.485 nm) sugieren que las condiciones de electrohilado y la composición química seleccionadas optimizan la morfología de las microfibras, en contraste con lo reportado por Xie y Xia (2008) sobre la influencia de los parámetros de electrohilado en la calidad de las microfibras.

Kulisc *et al.* (2005) reportaron factores de inhibición de la oxidación de 2.0 y 1.7 en confitados de cacahuate utilizando aceites esenciales de *Origanum vulgare L.* y *Thymus vulgaris L.*,

respectivamente. Sin embargo, a pesar de emplear concentraciones más elevadas y condiciones menos drásticas que las utilizadas en esta investigación, obtuvieron menores índices de inhibición, lo que resalta el elevado potencial antioxidante del extracto de cúrcuma.

Por otro lado, Alvis *et al.* (2011) obtuvieron extractos fenólicos de *Cúrcuma longa L.* y evidenciaron su capacidad antioxidante en lípidos de origen vegetal. Mediante el uso de etanol al 96%, compararon la actividad antioxidante de sus extractos con la del antioxidante sintético Butilhidroxitolueno (BHT), obteniendo una efectividad comparable entre ambos compuestos.

5. CONCLUSIÓN

La concentración alcohólica óptima para la extracción de la curcumina fue del 96%, lo que garantizó una eficiente recuperación de este compuesto. La formulación utilizada para generar microfibras capaces de encapsular curcumina consistió en una mezcla en proporción 1:1 de alcohol polivinílico al 10% y extracto alcohólico de cúrcuma de raíz en etanol (40:60 m/v) (E1). La técnica de electrohilado no solo permitió la encapsulación efectiva de los compuestos bioactivos, sino que también preservó sus propiedades antioxidantes y fluorescentes.

Las microfibras enriquecidas con cúrcuma demostraron un efecto antioxidante significativo cuando fueron aplicadas en un producto de confitería elaborado a base de almendras y sacarosa, en comparación con los empaques tradicionales utilizados para este tipo de producto, las microfibras mejoraron la estabilidad oxidativa del alimento bajo las mismas condiciones de almacenamiento, evidenciando su potencial en el desarrollo de empaques funcionales para la industria alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por el apoyo complementario brindado a esta investigación a través de la beca estudiantil otorgada a José María Fernández Luna, en el marco del programa *Becas por Proyecto de Investigación VIEP 2024*. Asimismo, expresamos nuestro reconocimiento al Instituto de Fisiología de la BUAP por facilitar el acceso al microscopio confocal, cuyo uso fue fundamental para el desarrollo de este estudio. Dos revisores anónimos aportaron sugerencias valiosas que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

José María Fernández-Luna llevó a cabo el trabajo experimental y redactó el manuscrito. Claudia Santacruz-Vázquez proporcionó la idea principal del proyecto el diseño del estudio y análisis de resultados. José Luis Córdova-de la Luz realizó la caracterización de las microfibras con curcumina mediante microscopía confocal. Verónica Santacruz-Vázquez y Santa Toxqui-López estuvieron a cargo del análisis de datos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en la realización de esta investigación ni en la publicación de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Alvis, A., Arrazola, G., & Martínez, W. (2012). Evaluación de la actividad y el potencial antioxidante de extractos hidro-alcohólicos de cúrcuma (*Curcuma longa*). *Información Tecnológica*, 23(2), 11–18. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200003>
- Bengmark, S., Mesa, M., & Gil, A. (2009). Efectos saludables de la cúrcuma y de los curcuminoides. *Nutrición Hospitalaria*, 24(3), 264–272.
- Bestvater, F., Spiess, E., Stobrawa, G., Hacker, M., Feurer, T., Porwol, T., Berchner-Pfannschmidt, U., Wotzlaw, C., & Acker, H. (2002). Two-photon fluorescence absorption and emission spectra of dyes relevant for cell imaging. *Journal of Microscopy*, 208, 108–115. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.2002.01078.x>
- Centeno, G., Trejo, F., Ancheyta, J., & Carlos, A. (2004). Precipitación de asfaltenos del crudo de maya en un sistema de a presión. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 48(3), 179–188.
- Duan, M., Sun, J., Huang, Y., Jiang, H., Hu, Y., Pang, J., & Wu, C. (2023). Electrospun gelatin/chitosan nanofibers containing curcumin for multifunctional food packaging. *Food Science and Human Wellness*, 12, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.064>
- Green, C. E., Hibbert, S. L., Bailey-Shaw, Y. A., Williams, L. A., Mitchell, S., & Garraway, E. (2008). Extraction, processing, and storage effects on curcuminoids and oleoresin yields from *Curcuma longa* L. grown in Jamaica. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3664–3670. <https://doi.org/10.1021/jf073105v>
- Jayaprakasha, G. K., Rao, L. J. M., & Sakariah, K. K. (2005). Chemistry and biological activities of *C. longa*. *Trends in Food Science & Technology*, 16(12), 533–548. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.006>
- Jiang, H., Timmermann, B. N., & Gang, D. R. (2006). Use of liquid chromatography–electrospray ionization tandem mass spectrometry to identify diarylheptanoids in turmeric (*Curcuma longa* L.) rhizome. *Journal of Chromatography A*, 1111(1), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.01.103>
- Kehinde, B. A., Majid, I., Hussain, S., & Nanda, V. (2020). Innovations and future trends in product development and packaging technologies. In *Functional and Preservative Properties of Phytochemicals* (pp. 377–409). Academic Press.
- Khan, M. S., Uddin, M. M., Rahman, R., Islam, S. M. R., & Amit, S. K. (2021). Electrospun nanofibers incorporated with essential oils: Applications in food. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 21(15), 1410–1425. <http://doi.org/10.2174/1389201024666230407094527>
- Kulusic, T., Radonic, A., & Milos, M. (2005). Inhibition of lard oxidation by fractions of different essential oils. *Revista de Grasas y Aceites*, 56(4), 284–291. <https://doi.org/10.3989/gya.2005.v56.i4.94>

- Mandal, V., Mohan, Y., & Hemalatha, S. (2008). Microwave-assisted extraction of curcumin by sample–solvent dual heating mechanism using Taguchi L9 orthogonal design. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 46(2), 322–327. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2007.10.020>
- Mesa, D., Ramírez, M., Aguilera, M., Ramírez, A., & Gil, A. (2000). Pharmacological and nutritional effects of *Curcuma longa* L. extracts. *Ars Pharmaceutica*, 41(3), 307–321.
- Mitra, S., Mateti, T., Ramakrishna, S., & Laha, A. (2022). A review on curcumin-loaded electrospun nanofibers and their application in modern medicine. *JOM*, 74(9), 3392–3407. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05180-9>
- Moghe, A. K., & Gupta, B. S. (2008). Coaxial electrospinning for nanofiber structures: Preparation and applications. *Polymer Reviews*, 48(2), 353–377. <https://doi.org/10.1080/15583720802022257>
- Ni, H., Zhou, X. H., Li, H. H., & Huang, W. F. (2009). Column chromatographic extraction and preparation of cordycepin from *Cordyceps militaris* waste medium. *Journal of Chromatography B*, 877, 2135–2141. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2009.06.009>
- Nwoso, S. C., Adaramoye, O. A., & Ajaiyeoba, E. O. (2009). Oral administration of extract *Curcuma longa* lowers blood glucose and attenuates alloxan-induced hyperlipidemia in diabetic rabbits. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(5), 625–628. <https://doi.org/10.3923/pjn.2009.625.628>
- Péret-Almeida, L., Cherubino, A. P. F., Alves, R. J., Dufossé, L., & Glória, M. B. A. (2005). Separation and determination of the physico-chemical characteristics of curcumin, demethoxycurcumin and bisdemethoxycurcumin. *Food Research International*, 38(8–9), 1039–1044. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.021>
- Ravindran, P. N., Nirmal Babu, K., & Sivaraman, K. (2007). *Turmeric: The genus Curcuma*. Taylor & Francis Group.
- Ríos, E., Duque, A., & León, F. (2009). Spectroscopy and chromatography characterization of curcumin extracted from the rhizome of turmeric crops in the department of Quindío (Colombia). *Revista Investigación Universidad del Quindío*, 19(1), 18–22. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol19n1.769>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2010). NMX-F-154-SCFI-2010. Alimentos – Aceites y grasas vegetales o animales. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-154-scfi-2010.pdf> (Consultado noviembre 2, 2024).
- Sheikh, S., Sturzu, A., Kalbacher, H., Nagele, T., Weidenmaier, C., Horger, M., Schwentner, C., Ernemann, U., & Heckl, S. (2018). A novel fluorescence-labeled curcumin conjugate: Synthesis, evaluation and imaging on human cell lines. *Current Pharmaceutical Design*, 24(16), 1821–1826. <https://doi.org/10.2174/1381612824666180406103317>

Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>

Xie, J., & Xia, Y. (2008). Electrospinning: An enabling technique for nanostructured materials. *Material Matters*, 3(1), 19–22.

Zhang, C., Li, Y., Wang, P., & Zhang, H. (2020). Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 479–502. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12536>

Zhang, Y., Li, J., & Li, B. (2022). Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review. *Food Research International*, 157, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111123>

Zhou, H., Beevers, C. S., & Huang, S. (2011). The targets of curcumin. *Current Drug Targets*, 12(3), 332–347. <https://doi.org/10.2174/138945011794815356>