

Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática Encapsulation of bioactive compounds: a systematic review

E. Díaz-Montes^{a*}, G.I. Cerón-Montes^a, E.A. Vargas-León^a

^aDivisión Químico Biológicas, Universidad Tecnológica de Tecámac, Carretera Federal México - Pachuca, Km. 37.5, Predio Sierra Hermosa, C.P. 55740, Tecámac, Estado de México, México.

Resumen

El presente estudio teórico es una revisión sistemática de investigaciones relacionadas con la encapsulación de compuestos bioactivos. La finalidad del estudio es mostrar la eficacia, los parámetros operativos y los productos resultantes con los diferentes métodos de encapsulación. La búsqueda de información se realizó en *Scopus*, *Google Académico*, y sitios de internet, usando las palabras clave en español/inglés: encapsulación, emulsión, extrusión, liofilización, secado por aspersión. Se resumieron los principales resultados de 103 artículos científicos, capítulos de libros y fichas técnicas publicados entre 2003 y 2022. La información de los últimos cinco años se seleccionó para los resultados, mientras que el resto de la información sirvió para resumir las características, fundamentos y análisis de los métodos de encapsulación. La información analizada mostró que los compuestos bioactivos (p. Ej., probióticos, compuestos fenólicos, ácidos grasos y aceites esenciales) pueden encapsularse con éxito, sin embargo, la protección dependerá del método de encapsulación, los materiales pared y las condiciones de operación.

Palabras Clave: Encapsulación, Emulsión, Extrusión, Liofilización, Secado por aspersión.

Abstract

The present theoretical study is a systematic review of research related to the encapsulation of bioactive compounds. The aim of the study is to show the efficacy, operating parameters, and the resulting products with the different encapsulation methods. The information search was carried out in *Scopus*, *Google Scholar*, and *Websites*, using the keywords in Spanish/English: encapsulation, emulsion, extrusion, lyophilization, spray drying. The main results of 103 scientific articles, book chapters and fact sheets published between 2003 and 2022 were summarized. The information from the last five years was selected for the results, while the rest of the information served to summarize the characteristics, foundations, and analysis of encapsulation methods. The information analyzed showed that bioactive compounds (e.g., probiotics, phenolic compounds, fatty acids, and essential oils) can be successfully encapsulated, however, protection will depend on the encapsulation method, wall materials, and operating conditions.

Keywords: Encapsulation, Emulsion, Extrusion, Lyophilization, Spray drying.

1. Introducción

Hasta hace algunos años, la alimentación del ser humano era elemental para su supervivencia; sin embargo, en la actualidad se sabe que además de la relación directa con el bienestar físico, involucra otros aspectos, por ejemplo, ideología, raza, disponibilidad, estado de ánimo, placer y nutrición (Yorde Erem, 2014). De tal manera que, las personas buscan satisfacer la mayoría de las necesidades físicas, fisiológicas y psicológicas por medio de los alimentos. Por ello, la industria alimentaria busca ofrecer alimentos que además de ser productos agradables en consistencia, sabor y olor; sean de fácil preparación, contengan ingredientes

naturales, aporte calórico y beneficios que a la salud de los consumidores (Alzate Yepes, 2019). Por ejemplo, se han creado alimentos funcionales con nutrientes y compuestos bioactivos provenientes de fuentes naturales, que incrementan los beneficios del producto (Silveira Rodríguez et al., 2003).

Los compuestos bioactivos son metabolitos secundarios como, ácidos fenólicos, flavonoides, carotenoides, vitaminas, ácidos grasos, aceites esenciales y probióticos (Kamiloglu et al., 2019); que se encuentran en alimentos naturales como vegetales, granos, frutas, tubérculos y microorganismos (Santos et al., 2019) y presentan actividad biológica (p. Ej., actividad antioxidante y antiinflamatoria). Una de las alternativas más empleadas para almacenar y conservar

*Autor para la correspondencia: elsadimo123@gmail.com

Correo electrónico: elsadimo123@gmail.com (Elsa Díaz-Montes), ivan_gcm@hotmail.com (Genaro Iván Cerón-Montes), enain_32@hotmail.com (Enaim Aída Vargas-León)

compuestos bioactivos, con la finalidad de ser adicionados a alimentos, es la encapsulación. Esta técnica protege compuestos de las condiciones ambientales (p. Ej., temperatura y oxígeno) y fisiológicas (p. Ej., ácido gástrico), además de tener una liberación controlada en el organismo (Castromonte et al., 2020). La encapsulación puede realizarse por diferentes procesos, entre los más conocidos están la liofilización, extrusión, emulsión y secado por aspersión (Nedovic et al., 2011; Đorđević et al., 2015). Esta revisión sistemática presenta un panorama general y los fundamentos de las técnicas más empleadas para la encapsulación, así como los avances que se han realizado en la aplicación de los métodos de encapsulación enfocados a la conservación de compuestos bioactivos en los últimos cinco años.

2. Metodología

2.1. Estrategia de búsqueda

La consulta bibliográfica se realizó entre los días 25 de mayo y 7 de julio de 2022 en las bases de datos *Scopus* y *Google Académico*, y sitios de internet de equipos de encapsulación. La búsqueda en las bases de datos se realizó usando las palabras claves en inglés/español: encapsulation, encapsulación, extrusion, extrusión, emulsion, emulsión, lyophilization, liofilización, freeze drying, secado por congelación, spray drying y secado por aspersión. Mientras que, en la búsqueda en los sitios de internet se realizó con el nombre del equipo: extrusor, dispersor, liofilizador y secado por aspersión.

2.2. Criterios de inclusión/exclusión

Se seleccionaron tres tipos de documentos: capítulos de libros, artículos de revisión, y artículos originales. Los capítulos de libros fueron seleccionados si el título tenía la palabra *encapsulación*, sin importar el año de publicación. Los artículos de revisión cumplieron dos criterios: publicados entre 2012 y 2022, y el título/resumen hizo referencia a procesos de encapsulación aplicados a productos alimenticios. Los artículos originales considerados fueron publicados entre 2017 y 2022, con especificación en el título de encapsulación compuestos bioactivos por los métodos de extrusión, emulsión, liofilización y secado por aspersión. Mientras que, los sitios de internet se eligieron con base en el tipo de información presentada, imágenes detalladas, fichas técnicas y prestigio comercial.

2.3. Proceso de selección

La selección de información introductoria, definiciones, contextualización y el panorama general se recopiló de los artículos de revisión y los capítulos de libros, de los cuales se consultó sus secciones de problemática, fundamentos y conceptos. Mientras que, la información para la discusión se sintetizó a partir de los artículos originales, particularmente de sus metodologías y hallazgos más relevantes.

2.4. Métodos de síntesis

La información consultada se sintetizó en tablas e imágenes, mismas que fueron descritas con mayor profundidad en el texto principal de la discusión, abundando en los compuestos bioactivos encapsulados por los diferentes métodos, los principales resultados y la influencia de los parámetros operativos de cada proceso sobre los compuestos bioactivos. Por otro lado, las imágenes de equipos e instrumentaria, así como la información del mercado nacional actual de productos encapsulados fueron obtenidos de los sitios de internet de empresas dedicadas a la venta de equipos de laboratorio y productos alimenticios encapsulados por secado por aspersión y liofilización. Finalmente, la conclusión describe el panorama actual de la encapsulación de compuestos bioactivos y da un preámbulo a la situación futura de éstos en el área de investigación e industria alimentaria.

3. Resultados

3.1. Selección de estudios

La búsqueda de cada palabra clave mostró 2511 referencias (artículos, capítulos de libros y sitios de internet), sin embargo, la aplicación de. Criterios de inclusión/exclusión (sección 2.2), permitió filtrar la información tal como se muestra en la Figura 1. Las referencias analizadas/reportadas corresponde al 4.1% de la información inicial de las bases de datos y sitios de internet.

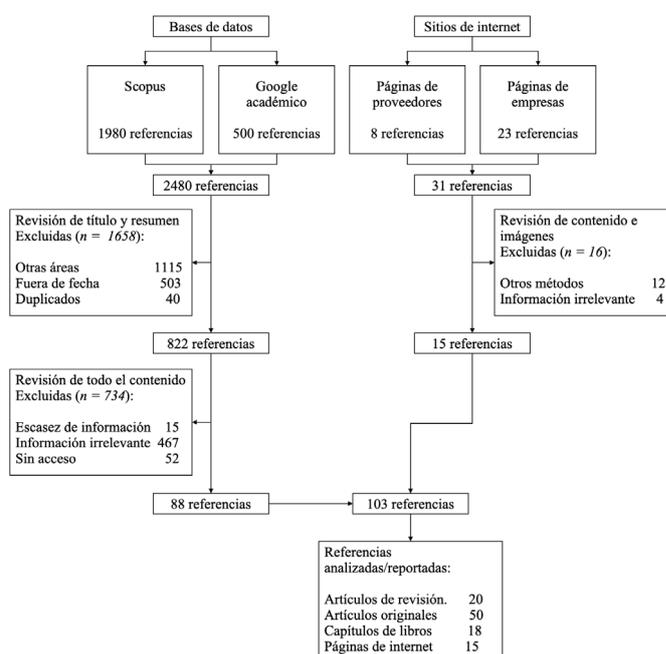


Figura 1. Diagrama de flujo de los elementos de informes preferidos para la revisión sistemática.

4. Discusión

4.1. Encapsulación

La encapsulación es una técnica empleada para proteger partículas, sustancias o compuestos; que se degradan fácilmente, se oxidan o pierden su actividad ante condiciones ambientales (Ribeiro et al., 2020). La finalidad de la encapsulación es proteger, estabilizar y retrasar la degradación

de compuestos de interés, por ejemplo, compuestos bioactivos; que naturalmente tienen una fácil modificación estructural debido a la luz, temperatura y calor (Nedovic et al., 2011).

La encapsulación se puede llevar a cabo con diversos encapsulantes (llamados materiales pared), equipos y metodologías, para generar cápsulas en tamaño nano (10 a 1000 nm) o micro (3 a 5000 µm) (Ezhilarasi et al., 2013; Tolve et al., 2016). De acuerdo con la base de datos *Scopus* (2022), los estudios que involucran métodos de encapsulación, particularmente extrusión (EX), emulsión (EM), liofilización (LI) y secado por aspersión (SA), van en aumento año con año, tal como se muestra en la Figura 2.

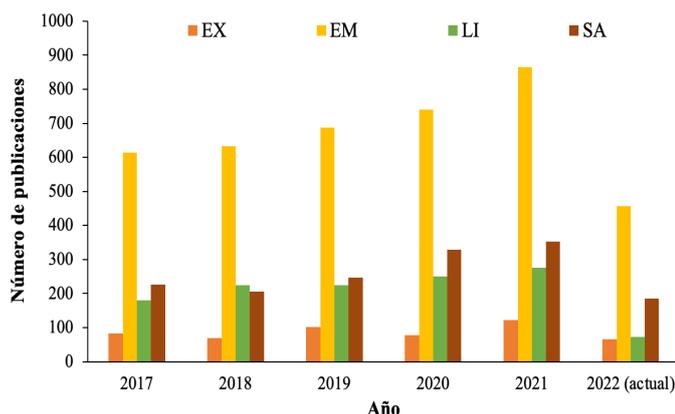


Figura 2. Publicaciones relacionadas con métodos de encapsulación: extrusión (EX), emulsión (EM), liofilización (LI) y secado por aspersión (SA). Fuente *Scopus*: palabras clave: encapsulation & extrusion; encapsulation & emulsion; encapsulation, lyophilization & freeze drying; encapsulation & spray drying (acceso: 28 de junio de 2022).

4.2. Métodos de encapsulación

La elección de la técnica de encapsulación se basa en las características de la partícula requeridas (p. Ej., tamaño, morfología y rugosidad), materiales pared (p. Ej., polisacáridos, lípidos o proteínas), escala (p. Ej., laboratorio, piloto o industrial) y aplicación (p. Ej., alimentos, farmacéutica, cosmética o textil) (Fang & Bhandari, 2012). En las Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de las características y ventajas/desventajas de los principales métodos de encapsulación, los cuales se describen en esta sección (subsecciones 3.1-3.4).

Tabla 1. Características de los métodos de encapsulación: extrusión (EX), emulsión (EM), liofilización (LI) y secado por aspersión (SA). Adaptado de Serna-Cock & Vallejo-Castillo (2013).

Método	Mecanismo	Cápsulas	
		Forma	Tamaño (µm)
EX	Reticulación	Esféricas	1600-5000
EM	Emulsificación	Esféricas	25-2000
LI	Sublimación	Irregulares	-
SA	Deshidratación	Esféricas	3-100

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de encapsulación: extrusión (EX), emulsión (EM), liofilización (LI) y secado por aspersión (SA). Adaptado de Basar et al. (2021) & Chaabane et al. (2022).

Ventajas/Desventajas	Método	EX	EM	LI	SA
Complejidad	Simple	✓	✓		✓
	Complejo			✓	
Tiempo de proceso	Rápido	✓	✓		✓
	Lento			✓	
Consumo de energía	Bajo	✓	✓		✓
	Alto			✓	
Precio	Costeable				✓
	Costoso	✓*	✓*	✓	
Escalable	Si			✓	✓
	No	✓	✓		
Eficiencia	Alta	✓	✓	✓	✓
	Baja				
Apto para compuestos termosensibles	Si	✓	✓	✓	
	No				✓
Apto para compuestos oxidables	Si	✓	✓	✓	
	No				✓

*Dependiente del equipo empleado



Figura 3. Sistema para el proceso de extrusión. Tomada de CRISOL (2022).

4.2.1. Extrusión (EX)

La EX es un proceso rápido, simple y económico; considerada como la técnica de encapsulación más antigua que se conoce. Este proceso consiste en formar una disolución entre un componente hidrocoloide y el componente de interés, para inyectarla a través de un orificio de boquilla y formar perlas (Serna-Cock & Vallejo-Castillo, 2013; Silva et al., 2018). La EX se puede realizar con un instrumento básico como una jeringa o uno muy complejo como una extrusora de fusión (Serna-Cock & Vallejo-Castillo, 2013; Bamide & Emmambux, 2020), que dependerán de los encapsulados que se desea obtener (Alam et al., 2016). En la Figura 3 se muestra el sistema básico de EX que se monta en un laboratorio, compuesto por una probeta y un soporte universal.

4.2.2. Emulsión (EM)

La EM es el proceso de encapsulación más simple, debido a que una fase discontinua (mezcla de hidrocoloide con el componente de interés) se dispersa en una fase continua (lípidos) hasta formar una EM de agua en aceite. Las perlas formadas se recuperan por decantación (Kakran & Antipina, 2014). Esta técnica se puede realizar con un mezclado manual, sin embargo, el empleo de dispersores automáticos como el de la Figura 4, mezcladores magnéticos o sonicadores optimizan el tiempo. La encapsulación por emulsión se realiza cuando se prefiere la estabilización de compuestos sobre la calidad, ya que no existe un control en la morfología, tamaño y rugosidad de las cápsulas (Serna-Cock & Vallejo-Castillo, 2013).



Figura 4. Dispersor Ultra-Turrax IKA T50. Tomada de IKA (2022).

4.2.3. Liofilización (LI)

La LI es uno de los métodos de encapsulación más empleados, debido a su simplicidad (Pudziulyte et al., 2020). Este proceso se basa en la sublimación de una muestra congelada, en tres etapas continuas: congelación, secado primario o sublimación y secado secundario o desorción (Fang & Bhandari, 2012). Este proceso es adecuado para compuestos sensibles a las altas temperaturas como nutraceuticos e ingredientes alimentarios, debido a que son protegidos en materiales pared como disacáridos, gomas y maltodextrinas (Fang & Bhandari, 2012; Pudziulyte et al., 2020). En la Figura 5 se muestra un liofilizador de laboratorio.



Figura 5. Liofilizador LABCONCO 4.5L. Tomada de LABCONCO (2022).

4.2.4. Secado por aspersión (SA)

El SA es un proceso continuo, simple, económico y con alto rendimiento, que produce polvos de calidad (Nedovic et al., 2011; Đorđević et al., 2015). Este proceso se ejecuta en cuatro etapas consecutivas: atomización, contacto aire-gota, evaporación y recolección (Díaz-Montes et al., 2021). Las condiciones operativas de un secador por aspersión como, la presión de atomización, flujo de alimentación, temperatura de entrada y velocidad de aspiración son responsables de producir encapsulados con diversas características (p. Ej., morfología, tamaño de partícula, humedad, cristalinidad y retención de compuestos) (Anandharamakrishnan & Padma, 2015; Ohtake et al., 2020). Comercialmente se encuentran equipos de secado por aspersión de diferentes escalas y características (Díaz-Montes et al., 2022), en la Figura 6 se ilustra un equipo a escala laboratorio.



Figura 6. Secador por aspersión BÜCHI B-290. Tomada de BÜCHI (2022).

4.3. Encapsulación de componentes bioactivos

Los procesos de encapsulación tienen aplicación en diferentes áreas, como farmacéutica, cosmética, veterinaria, higiene, alimentaria, entre otras. Sin embargo, la aplicación más reportada está enfocada con la generación de partículas con ingredientes activos (compuestos bioactivos) para suministrarse como ingredientes alimentarios (Favaro-Trindade et al., 2021). En esta sección (subsecciones 4.1-4.2) se discuten los métodos de encapsulación empleados en la conservación de compuestos bioactivos (Tabla 3).

4.3.1. Encapsulación de compuestos fenólicos

De acuerdo con la base de datos de *Scopus* (2022), los fenoles (compuestos fenólicos) son los compuestos más encapsulados, debido a que incluyen un vasto conjunto de moléculas, que acorde a sus características pueden ser clasificar en ácidos fenólicos, cumarinas, taninos, flavonoides, quinonas, lignanos, etc. (Gan et al., 2019). Los compuestos fenólicos se pueden proteger con cualquier método de encapsulación (Tabla 3).

Las antocianinas (p. Ej., flavonas, chalconas y quinonas) son pigmentos naturales responsables de la gama de colores del rojo al azul de las plantas, vegetales y frutos (Guo & Xia, 2018). Baeza et al. (2020) liofilizaron antocianinas extraídas del fruto del saúco con maltodextrina, promotor, Capsul y κ -carragenina, y notaron que el material pared tuvo un efecto

significativo en la cantidad de componentes encapsulados. El estudio reportó hasta 29% mayor contenido de antocianinas en los encapsulados con κ -carragenina en comparación con los otros materiales pared. Los autores relacionaron la disponibilidad de la κ -carragenina para la retención de los componentes como un efecto de la cantidad de esta. Por otro lado, Baeza et al. (2020) realizaron una evaluación de la retención de antocianinas durante un periodo de 90 días a 38°C y notaron que la κ -carragenina mantuvo la estabilidad de los componentes hasta 88%, mientras que con la maltodextrina fue de 72%.

Mientras que, Yamashita et al. (2017) reportan la liofilización de antocianinas de zarzamora con dos diferentes maltodextrinas (10 y 20 DE). Los liofilizados presentaron una reducción significativa hasta 63% del contenido del extracto previo a la encapsulación, sin embargo, los encapsulados de maltodextrina 20 DE mantuvieron significativamente más elevado el contenido de los componentes. Con base en estudios previos, los autores (Yamashita et al., 2017) afirmaron que estos resultados derivan de la concentración de la dispersión inicial, es decir, a mayor contenido de sólidos mayor degradación de componentes. Aunado a esto, el análisis fisicoquímico y morfológico de ambos tipos de encapsulados, sugirió que la maltodextrina 10 DE es el material pared adecuado para la liofilización de antocianinas, debido a que la dimensión de las partículas que se produjeron disminuyó la probabilidad de degradación por condiciones ambientales.

Los carotenoides (p. Ej., carotenos y xantofilas) son otros compuestos fenólicos producidos de organismos fotosintéticos (p. Ej., algas y plantas) que pigmentan de color amarillo, naranja y rojo (Miller et al., 2014). El estudio de Basar et al. (2020) reporta 100% de eficiencia en la encapsulación de β -caroteno comercial con una técnica de emulsión acoplada a una electro-pulverización. Los autores atribuyeron el éxito de encapsulación al tipo de solvente involucrado (p. Ej., cloruro de colina, propanediol y butanediol) y el voltaje (17-23 kV) que lograron la emulsión de los componentes. Además, en el reporte de estabilidad, el estudio resaltó la conservación del 80% de lo β -caroteno en un periodo de 180 min en comparación con la degradación del 100% de los componentes sin encapsular en el mismo periodo de tiempo.

Nogueira et al. (2017), liofilizaron carotenoides sintetizados por una especie de *Phaffia rhodozyma* con dos concentraciones de proteína de soya. El proceso tuvo un rendimiento de >96% y una eficiencia de encapsulación de 65%. En este estudio no se reportó una diferencia significativa entre los resultados respecto a la variación en el material pared, lo que sugiere que la elección de la formulación con menor cantidad de material puede reducir los costos del proceso.

Por otro lado, los ácidos fenólicos (p. Ej., gálico, cumárico, sináptico, cafeico y siríngico) son los compuestos fenólicos más simples que se derivan de los ácidos benzoico y cinámico, mismos que pueden aislarse como moléculas libres o unidas entre sí (Ratnavathi, 2019). Pashazadeh et al. (2021) compararon el SA y la LI en la encapsulación de ácidos fenólicos extraídos de residuos de maíz, por lo que partieron a partir de una misma dispersión con maltodextrina como material pared. Los resultados reportados mostraron que, aunque la eficiencia de encapsulación de ambos procesos fue de >99%, hubo variaciones numéricas en la concentración de componentes retenidos. Por ejemplo, los encapsulados

provenientes del proceso de LI mostraron mayor concentración de ácidos protocateuico, cumárico, salicílico y catequina (89, 10, 40 y 35%, respectivamente); mientras que las cápsulas secadas por aspersión tuvieron concentraciones superiores de ácido hidroxibenzoico (74%). El estudio demostró que las temperaturas empleadas en los procesos de SA pueden afectar considerablemente a los compuestos fenólicos que son termosensible, por lo que la LI se consideró el proceso más eficiente en el proceso de encapsulación de ácidos fenólicos.

Los flavonoides son los compuestos fenólicos de cadenas largas como, la quercetina, rutina y cumarina, que se localizan en frutos y vegetales (Trugo et al., 2003). Carpenter et al. (2019) encapsularon curcumina comercial con dos variantes de emulsiones: 1) aceite-proteína y 2) aceite-proteína-alginato, las cuales se sonicaron para eficientizar la emulsificación. El estudio reportó que la emulsión 1 requirió hasta 15 min de sonicación para lograr un 100% en la eficiencia de encapsulación, por el contrario, la emulsión 2 presentó el 100% de eficiencia a los 30 s del inicio de sonicación; sin embargo, con la exposición de un tiempo mayor no se produjo un cambio en la eficiencia. Los resultados de los encapsulados de la emulsión 2 se reflejaron en una la mayor actividad antioxidante (hasta 40%) en comparación con la actividad de la emulsión 1.

Guo et al. (2020) por otro lado, emplearon los procesos de LI y SA para encapsular curcumina. El estudio reportó 12 combinaciones de mezclas de materiales pared (almidón, inulina, maltodextrina, gelatina, pectina, gomas y ciclodextrina). Los resultados mostraron variaciones significativas en la eficiencia de encapsulación y retención de los componentes dependiendo de la combinación de los materiales pared. En ambas técnicas, la combinación inulina-maltodextrina-goma mostró la mayor eficiencia de encapsulación (entre 82 y 89%); la menor eficiencia en el proceso de SA (41%) fue con la combinación inulina-ciclodextrina-pectina, mientras que en el proceso de LI (54%) fue al emplear inulina-ciclodextrina-goma. En relación con la estabilidad térmica, el sistema almidón-maltodextrina-gelatina tuvo el mayor resultado durante la LI, y la combinación almidón-ciclodextrina-gelatina en el proceso de SA; mientras que, los porcentajes menores resultaron con las combinaciones almidón-ciclodextrina-pectina e inulina-ciclodextrina-goma, respectivamente. Aunado a esto, los autores expusieron una mayor estabilidad de los encapsulados obtenidos por SA al incorporarse en una bebida carbonatada. De manera concluyente, Guo et al. (2020) expusieron las variaciones fisicoquímicas de los encapsulados, dejando en claro que existe una variación significativa entre los resultados de ambos procesos, pero mayormente entre las combinaciones de los materiales pared.

Los compuestos fenólicos son sustancias termosensibles, lo que significa que, con el aumento en la temperatura, se modifican estructuralmente y pierden su funcionalidad. Estos estudios demuestran la efectividad de la encapsulación para mantener su actividad; sin embargo, también es importante resaltar que el éxito dependerá del tipo y concentración de material pared, el método y las condiciones de encapsulación, y la fuente y el tipo de componentes fenólico.

4.3.2. Encapsulación de aceites esenciales

De acuerdo con la Tabla 3, los aceites esenciales son otros componentes activos de los cuales se reporta su encapsulación con cualquier técnica. Estos aceites son componentes volátiles y olorosos procedentes de cualquier parte de la planta (p. Ej., semillas, flores, raíces y capullos), extraídos con destilación, presión o disolventes (Sankarikutty & Narayanan, 2003). Enciso-Sáenz et al. (2018) emplearon el método de LI para encapsular aceites esenciales de hierba limón (α -citral, β -citral, β -mirceno y linalol), con 12 combinaciones de materiales pared (maltodextrina, goma arábiga y goma xantana). Los resultados de retención inicial indicaron que la combinación de materiales pared 4:5:1 con relación a la emulsión (material pared:aceites esenciales) de 1:09 presentó mayor retención (72 g/100 mL), mientras que la combinación 4:1:5 con relación 01:05 mostró la menor retención (36 g/100 mL) de los aceites esenciales totales. Este estudio comparó la eficacia de la LI (proceso de 24 h) con un congelamiento con nitrógeno (proceso de 10 min), y los resultados indicaron que independientemente de la combinación de materiales pared, el método lento retuvo significativamente menor contenido de aceites esenciales. Este fenómeno se puede atribuir a la variación en la cristalización de la emulsión, en los procesos

de congelación lenta se formaron cristales grandes capaces de mantener su estructura reticulada; mientras que en la congelación rápida se estructuraron cristales pequeños incapaces de mantener una red tridimensional compacta, por lo que se dificultó mantener encapsulados los componentes (Choi et al., 2004).

Santana-Aguiar et al. (2020) evaluaron un modelo analítico que relacionó dentro de un proceso de SA, las variables operativas (temperatura de secado, flujo de aire de secado y flujo de alimentación), surfactante (sorbitán), adyuvante (dióxido de silicio) y materiales pared (gelatina y lignina) para encapsular aceites esenciales de naranja (D-limoneno). Los autores reportaron mayor eficiencia de encapsulación (97%) cuando se emulsionó D-limoneno y gelatina en relación 1:3.56(5%), sin adyuvante y surfactante, y con variables operativas de 150°C, 536 L/h y 0.15 L/h, respectivamente. Mientras que, el mayor contenido de D-limoneno se obtuvo al emplear variables operativas de 150°C, 536 L/h y 0.45 L/h, respectivamente; y una emulsión de D-limoneno y gelatina en relación 1:1.78(10%), sin adyuvante y surfactante. El estudio de Santana-Aguiar et al. (2020) validó un método cuantitativo que permitió estudiar la influencia que tienen las variables en los productos encapsulados, de tal forma que se pudieron descartar o aceptar dentro del proceso de SA.

Tabla 3. Encapsulación de compuestos bioactivos mediante extrusión (EX), emulsión (EM), liofilización (LI) y secado por aspersión (SA).

Método	Componente bioactivo	Referencias
EX	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites esenciales (almendras, toronja) • Ácidos grasos (canola) • Fenoles (antocianinas, quercetina, ácido ascórbico) • Probióticos (<i>L. plantarum</i> spp., <i>L. casei</i> spp., <i>L. delbrueckii</i> spp.) 	Olivares et al., 2017; Khor et al. 2017; Lucía et al., 2017; Eckert et al. 2018; Chang et al. 2019; Chang et al., 2019; Bamidele & Emmambux, 2020; Cáceres et al., 2020; Shaaban & Farouk, 2022
EM	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites esenciales (orégano, mandarina, limón, menta, eucalipto, tomillo, carvacrol, limoneno) • Ácidos grasos (atún, café, tomillo, menta, eucalipto, cacahuate) • Fenólicos (polifenoles, antocianinas, luteína, flavonoides, betacianina, betaxantina, taninos, carotenos, licopeno, tocoferol, curcumina, quercetina, catequina, resveratrol, propóleo, tangeretina, nobiletina, ácido gálico, Stevia) • Vitaminas (A, D, E, K) 	Micanquer-Carlosama et al., 2017; Jemaa et al., 2018; Pulit-Prociak et al., 2019; Mudric et al., 2019; Carpenter et al., 2019; Stasse et al., 2019; Suyanto et al., 2019; Banasaz et al., 2020; Basar et al., 2020; Medina-Pérez et al., 2020; Ozkan et al., 2020; Dammak et al., 2021; Paulo et al., 2021; Tessaro et al., 2022
LI	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites esenciales (mirceno, citral, linalol, oleorresina) • Ácidos grasos (palmítico, oleico, linoleico, esteárico, pescado, eucalipto) • Fenoles (polifenoles, antocianinas, carotenoides, flavonoides, betaninas, curcumina, propóleo, ácido gálico, ácido cumárico, oleuropeína, ácido ferúlico) 	Ballesteros et al., 2017; Marín et al., 2017; Yamashita et al., 2017; Nogueira et al., 2017; Enciso-Sáenz et al., 2018; Mangiring et al., 2018; Krisanti et al., 2019; Rezvankhah et al., 2019; Guo et al., 2020; Forstinus Nwabor et al., 2020; Baeza et al., 2020; Ogrodowska et al., 2020; González-Ortega et al., 2020; Pashazadeh et al., 2021; Jovanović et al., 2021; Bhagya Raj & Dash, 2022; Xin et al., 2022
SA	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites esenciales (limoneno, naranja) • Ácidos grasos (palmítico, oleico, linoleico, esteárico, semilla de uva, pescado) • Fenoles (polifenoles, carotenos, antocianinas, licopeno, curcumina, vainillina, ácido gálico, ácido cumárico, ácido ferúlico) • Probióticos (<i>L. acidophilus</i> spp., <i>L. paracasei</i> spp.) 	Ballesteros et al., 2017; Böger et al., 2018; Rezvankhah et al., 2019; Leyva-Jiménez et al., 2020; Guo et al., 2020; Neves et al., 2019; Kathiman et al., 2020; Ogrodowska et al., 2020; Santana Aguiar et al., 2020; Navarro-Flores et al., 2020; Pashazadeh et al., 2021; Jovanović et al., 2021; Jordán-Suárez et al., 2021; Xin et al., 2022

Otro ejemplo de encapsulación de aceites esenciales esta reportado por Cáceres et al. (2020), quienes usaron un proceso de extrusión en una matriz de alginato en un medio de cloruro de calcio para encapsular aceites esenciales de toronja. Ante la variación de la concentración del cloruro de calcio (2, 5 y 10%) y el tiempo de agitación (30, 45 y 60 min) se notó variación en la eficiencia y rendimiento de proceso. Por un lado, la eficiencia osciló entre 94 y 100%; resaltando que con 2 y 10% de la sal y 60 min de agitación se logró el 100%. Mientras que, el rendimiento varió entre 42 y 68%; con el máximo porcentaje al emplearse el 5% de la sal y mezclarse durante 30 o 45 min. Además, las cápsulas mostraron 60% de liberación del aceite esencial los primeros 58 min, que correspondían a los componentes incrustados en la superficie de las cápsulas, mientras que entre los 60 y 300 minutos la liberación aumentó al 80% que correspondían al resto de los componentes provenientes del interior de las cápsulas.

La encapsulación de aceites esenciales debe cumplir un doble objetivo ya que son componentes importantes por su capacidad como sabores y olores, por un lado, cualquier técnica de encapsulación debe estabilizarlos y protegerlos; pero más importante aún debe permitir su liberación de manera controlada.

4.3.3. Encapsulación de ácidos grasos

Los ácidos grasos son ácidos carboxílicos (p. Ej., palmítico, láurico, linoleico y oleico) que naturalmente se constituyen por una cadena alifática saturada o insaturada de 4 a 28 carbonos. En la naturaleza se encuentran formando parte de la estructura celular de plantas y animales (Aslan & Aslan, 2017). La encapsulación de ácidos grasos se ha reportado por diversos autores (Tabla 3), por ejemplo, Böger et al. (2018), extrajeron aceite de semillas de uva para encapsularlo con maltodextrina y goma arábiga por técnica de SA. El proceso general mostró una eficiencia de encapsulación de 68% al usarse maltodextrina y de 63% con maltodextrina-goma arábiga; sin embargo, la retención del aceite fue de 92% con ambas matrices poliméricas. El estudio de caracterización de los encapsulados identificó seis ácidos grasos: mirístico, palmítico, estérico, oleico, linoleico y linoléico; cuya cuantificación individual y total no mostró diferencia significativa entre ambos tipos de cápsulas.

Por su parte, Ogródowska et al. (2020) compararon las técnicas de LI y SA para encapsular aceite de semilla de colza, lino y cártamo. Partiendo de una EM entre los aceites y el material pared: maltodextrina-proteína de suero concentrada-goma guar, el contenido superficial de aceite fue significativamente mayor en los procesos de LI (hasta 73%). No obstante, la cuantificación del contenido total de aceite no mostró diferencia significativa entre las cápsulas de ambos procesos. Por otro lado, al analizar la eficiencia de los procesos de SA y LI, el mayor porcentaje fue de 90 y 63%, respectivamente, lo cual marca una notable diferencia significativa. La identificación y cuantificación de componentes en los dos encapsulados no mostró una variación significativa del contenido de ácido palmítico, estérico, oleico, linoleico y linoléico. Aunado a ello, el estudio identificó y cuantificó el contenido de esteroides (p. Ej., brasicasterol, avenasterol y campesterol) y tocoferoles (p. Ej., α , β , δ y γ).

Los ácidos grasos son componentes altamente oxidables en una exposición normal luz y oxígeno, por lo que el papel principal de la encapsulación debe estabilizarlos y protegerlos de estas condiciones ambientales.

4.3.4. Encapsulación de probióticos

Los probióticos se definen como cualquier microorganismo vivo no patógeno (p. Ej., flora intestinal y bacterias lácticas) que induce efectos positivos sobre el consumidor, por ejemplo, regulación del tracto intestinal o modulación del crecimiento bacteriano patógeno (Kunes & Kvetina, 2016). En la Tabla 3 se enlistan algunos estudios en los cuales se encapsulan probióticos, como se observa que SA y EX son los métodos que se han empleado en la encapsulación de probióticos; sin embargo, EX se considera la mejor estrategia para microorganismos debido a que no requiere altas temperaturas y ni solventes orgánicos (Vos et al., 2010). Por ejemplo, el estudio de Silva et al. (2018) reporta la comparación de dos variantes de EX (EX simple y co-EX) para encapsular una cepa de *Lactobacillus acidophilus* previamente liofilizadas. En el proceso simple, los probióticos fueron extruidos mediante una boquilla mono-céntrica a una solución de alginato o alginato-goma laca; mientras que en la co-EX, las bacterias se dispersaron en aceite de girasol y extruidos con una boquilla concéntrica a una solución de alginato o alginato-goma laca. La viabilidad evaluada durante un periodo de almacenamiento (60 días a temperatura ambiente), indicó las cápsulas co-extruidas tuvieron estadísticamente mayor viabilidad en comparación con las extruidas por la técnica simple; sin embargo, el estudio demostró que en ninguno de los procesos hubo diferencia significativa respecto al material pared. Estos resultados fueron atribuidos a la barrera adicional que confiere el aceite de girasol en el proceso de co-EX. La evaluación morfológica indicó que la mezcla de goma laca y alginato generaron formas más esféricas y menos porosas en comparación con el alginato simple. Finalmente, la exposición de las cápsulas en un medio ácido que simuló los fluidos gastrointestinales mostró una disminución significativa de la viabilidad bacteriana, sin embargo, es importante resaltar que después de un periodo de 300 min, las cápsulas co-extruidas con alginato-goma laca perdieron la menor viabilidad de todos los ensayos.

Olivares et al. (2017) realizaron la encapsulación de tres cepas de *Lactobacillus* spp. (*L. casei*, *L. reuteri* y *L. delbrueckii*) dispersas alginato, en un extrusor comercial que dosificó las gotas a un medio de cloruro de calcio mientras emitía voltaje. Las cepas encapsuladas se sometieron 120 min a disoluciones a diferentes pH (pH 2-4) que simulaban la acidez estomacal. Conforme se disminuyó el pH y se aumentó el tiempo de exposición, *L. casei*, *L. reuteri* y *L. delbrueckii* fueron perdiendo viabilidad; por ejemplo, a los 120 min en pH 4 se redujo 3, 2, 2%, respectivamente; en pH 3.5 (120 min) la reducción fue 13, 6, 11% respectivamente; mientras que, a pH 3 (120 min) la viabilidad de las cepas disminuyó 29, 100, 15% respectivamente. La exposición a pH 2.5 provocó la viabilidad a los 60 min disminuyera 29, 14, 100%, respectivamente, y a 120 min de exposición no hubiera células vivas; mientras que en pH 2 *L. casei* resultó la única que permaneció viable a los 30 min.

Usando el mismo método que Olivares et al (2017), Eckert et al. (2018) realizaron la encapsulación de tres cepas de *Lactobacillus* spp. (*L. plantarum*, *L. paracasei* y *L. pentosus*) dispersas en medios de suero de queso-alginato-pectina o permeado de suero-alginato-pectina. La viabilidad de las cepas varió entre 93 y 99%, dependiendo del sistema; sin embargo, la evidencia mostró que las cápsulas de *L. paracasei* tuvieron mayor conteo de células. Al someter las cápsulas a un almacenamiento en frío (4°C) por tres meses, los autores (Eckert et al., 2018) notaron que la viabilidad se mantuvo dos semanas, a partir de ese momento fue decayendo con diferente velocidad dependiendo de la cepa. Para el término del almacenamiento (día 90), *L. paracasei* disminuyó su viabilidad 26% independientemente del material pared; el conteo de *L. pentosus* encapsulada en suero de queso-alginato-pectina decreció 29%, y permeado de suero-alginato-pectina disminuyó 37% (similar a las cepas sin encapsular); mientras que, la viabilidad de *L. plantarum* disminuyó entre 11 y 17%. Por otro lado, la exposición a un medio que simuló el pH del tracto intestinal redujo tan solo 10% de la viabilidad celular en las cápsulas con *L. paracasei* y *L. pentosus*, y hasta 29% de *L. plantarum* encapsulada con permeado de suero-alginato-pectina.

Estos estudios (Silva et al., 2018; Olivares et al., 2017; Eckert et al., 2018) demostraron que cuando se trata de organismos vivos, su supervivencia dependerá de las propias características y resistencia a las condiciones de exposición; debido a que, independientemente del material pared que se

empleó, los resultados estuvieron influenciados por la cepa encapsulada. Sin embargo, para que una cantidad adecuada de probióticos puedan sobrevivir el proceso intestinal y tengan un efecto positivo en el organismo, es necesario que inicialmente se consuma una carga bacteriana muy grande o que las bacterias estén encapsuladas (Rajam & Subramanian, 2022).

4.4. Aplicación de la encapsulación

La importancia de encapsular compuestos bioactivos tiene muchas vertientes dependiendo del área de análisis, por ejemplo, los especialistas ambientales ven a la encapsulación como una acción en pro del medio ambiente cuando los componentes provienen de residuos industriales (p. Ej., aguas residuales y aguas fermentadas) (Muangrat et al., 2019) o subproductos alimentarios (p. Ej., cáscaras, semillas y bagazos) (Marcillo-Parra et al., 2021); los nutriólogos y entrenadores incluyen en sus planes alimenticios productos comerciales (p. Ej., yogurt, proteína aislada y café) con componentes adicionales que ayuden a cumplir con los requerimientos calóricos, energéticos y nutricionales (Kerksick et al., 2018); mientras que, los médicos le apuestan a los productos alimenticios con componentes bioactivos como una estrategia de prevención y tratamiento de enfermedades (p.

Tabla 4. Empresas mexicanas dedicadas a la comercialización de productos encapsulados mediante liofilización (LI) y secado por aspersión (SA).

Empresa	Método	Producto encapsulado	Sitio de internet
AG	SA	Huevo	https://www.alimentosdelagranja.com.mx
Complementos Alimenticios S.A. DE C.V.	SA	Sustitutos de leche Néctares y jarabes Aislados proteicos Azúcares Jugos y pulpas Harinas Base para bebidas	https://www.complementosalimenticios.com
FALANX	SA	Sustitutos de leche Bebidas de soya Grasas funcionales Leche Jugo de limón Levaduras	https://www.falanx.com.mx
JOBARI	SA	Sabores Colores Bases para bebidas	https://www.jobari.com
Natdry®	SA y LI	Jugos de frutas Pulpas de vegetales	https://www.natfruit.com
CAFESCA	LI	Café	https://www.cafesca.com
DILAC	LI	Productos lácteos	https://www.dilac.com.mx
LioMex	LI	Jugos de frutas Pulpas de frutas Aguacate	https://liomex.com
PILSAC	LI	Grenetina Gelatina	http://www.pilsac.com.mx
SíoSío	LI	Aguacate Jugos de frutas Pulpas de frutas	https://es.siosi.com.mx

Ej., cáncer y obesidad) (González, 2020), recientemente interesados en fortalecer el sistema inmune para combatir el COVID-19 (Tripathy et al., 2021). No obstante, todas las áreas tienen el objetivo común de conservar las propiedades bioactivas de los componentes dentro de productos que pueda consumir el ser humano.

Sin embargo, de manera comercial no existen gran variedad de productos que contengan componentes bioactivos encapsulados mediante técnicas de EX y EM, ya que esas metodologías son difícilmente escalables (Tabla 2). La LI y el SA son técnicas más estudiadas en los centros de investigación, ya que su evaluación a pequeña escala permite limitar el alcance de su aplicación industrial. Por ejemplo, El-Messery et al. (2019) encapsularon componentes fenólicos extraídos de la piel de manzana por SA y LI para incorporarlos en yogurt con probióticos suspendidos (*Streptococcus thermophiles* and *Lactobacillus delbrückii* spp. *bulgaricus*). Los resultados indicaron los componentes actuaron como prebióticos de las bacterias por lo que mejoraron su actividad, además, de evitar la acidificación de los productos. Por otro lado, Marín-Peñalver et al. (2021) elaboraron rollos de surimi con cápsulas de carragenina secadas por aspersión con colágeno, polifenoles de granada y astaxantina de camarón. Los autores reportan un aumento en la estabilidad de las barras con la incorporación de compuestos encapsulados, sin embargo, la actividad antioxidante y resistencia a la digestión gastrointestinal simulada disminuyeron al incorporarse los componentes; lo que sugiere que un cambio en el material pared mejoraría los resultados.

Por otro lado, la aplicación industrial de LI y SA es una realidad en todo el mundo, ya que existe gran variedad de productos comercializados que fueron conservados mediante estas técnicas. En la Tabla 4 se muestran ejemplos de empresas mexicanas dedicadas a conservar alimentos y componentes extraídos de fuentes naturales mediante estas metodologías.

5. Conclusiones

En esta revisión sistemática se estudiaron cuatro técnicas de encapsulación de componentes bioactivos. Los resultados mostraron que la encapsulación es una técnica bastante aplicada en los centros de investigación debido a su efectividad para proteger y estabilizar componentes bioactivos. El empleo de materiales pared de fuentes no convencionales, la mezcla de diferentes materiales pared o la protección de nuevos componentes genera la necesidad de un estudio constante. Sin embargo, la aplicación de la encapsulación de productos alimenticios o componentes bioactivos en matrices alimentarias es un campo poco explotado en la industria, ya que la deshidratación y el secado son las técnicas más empleadas para comercializar productos. Esta situación abre la oportunidad para que las investigaciones basadas en métodos de encapsulación se consideren para su aplicación en productos alimenticios para comercializar, que además de conservar/proteger al alimento o a los componentes contenidos en el alimento, potencialicen su valor nutrimental y funcional, y sirvan como alternativas de productos funcionales que satisfagan las necesidades físicas, fisiológicas y psicológicas de las personas, a costos más accesibles que los que actualmente se encuentran en venta.

Referencias

- AG: Alimentos de la Granja S.A. de C.V. Disponible en línea: <https://www.alimentosdelgranja.com.mx> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H. & Gupta, K. (2016). Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56:3, 445-473. DOI: 10.1080/10408398.2013.779568
- Alzate Yepes, T. (2019). Dieta saludable. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 21(1), 9-14. DOI: 10.17533/udea.penh.v21n1a01
- Anandharamakrishnan, C. & Padma I. S. (2015). *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 9781118864197
- Aslan, I. & Aslan, M. (2017). Plasma Polyunsaturated Fatty Acids After Weight Loss Surgery. En Rajendram, R., Martin, C. R. & Preedy, V. R. *Metabolism and Pathophysiology of Bariatric Surgery*, pp. 529-534. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128040119
- Baeza, R., Sánchez, V., Salierno, G., Molinari, F., López, P. & Churife, J. (2020). Storage stability of anthocyanins in freeze-dried elderberry pulp using low proportions of encapsulating agents. *Food Science and Technology International*, 0(0), 1-20. DOI: 10.1177/1082013220937867
- Ballesteros, L. F., Ramirez, M. J., Orrego, C. E., Teixeira, J. A. & Mussatto, S. I. (2017). Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. *Food Chemistry*, 237, 623-631. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.05.142
- Bamidele, O. P. & Emmambux, M. N. (2020). Encapsulation of bioactive compounds by “extrusion” technologies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61:18, 3100-2118. DOI: 10.1080/10408398.2020.1793724
- Banasaz, S., Morozova, K., Ferrentino, G. & Scampicchio, M. (2020). Encapsulation of Lipid-Soluble Bioactives by Nanoemulsions. *Molecules*, 25(17), 3966. DOI: 10.3390/molecules25173966
- Basar, A. O., Prieto, C. & Lagarón, J. M. (2021). Novel Encapsulation of Bioactives: Use of Electrohydrodynamic Processing and Applications. En Lagarón, J. M. *Importance & Applications of Nanotechnology*, pp. 24-46. Nevada, US: MedDocs Publishers LLC. ID 236844335
- Basar, A. O., Prieto, C., Durand, E., Villeneuve, P., Sasmazel, H. T. & Lagarón, J. (2020). Encapsulation of β -Carotene by Emulsion Electro-spraying Using Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, 25(4), 981. DOI: 10.3390/molecules25040981
- Bhagya Raj, G. V. S. & Dash, K. K. (2022). Microencapsulation of Dragon Fruit Peel Extract by Freeze-Drying Using Hydrocolloids: Optimization by Hybrid Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. *Food and Bioprocess Technology*, 1-17. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1432238/v1
- Böger, B. R., Georgetti, S. R. & Kurozawa, L. E. (2018). Microencapsulation of grape seed oil by spray drying. *Food Science and Technology*, 38(2), 263-270. DOI: 10.1590/fst.04417
- BÜCHI: Labortechnik. Secado por aspersión. *Mini Secador por aspersión B-290*. Disponible en línea: <https://www.buchi.com/es> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Cáceres, L. M., Velasco, G. A., Gagnino, E. P., Chamorro, E. R. (2020). Microencapsulation of Grapefruit Oil with Sodium Alginate by Gelation and Ionic Extrusion: Optimization and Modeling of Crosslinking and Study of Controlled Release Kinetics. *Revista Tecnología y Ciencia*, 18(39), 41-61. DOI: 10.33414/rtyc.39.41-61.2020
- CAFESCA: Café de especialidad de Chiapas SAPI de C.V. Disponible en línea: <https://www.cafesca.com> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Carpenter, J., George, S. & Saharan, V. K. (2019). Curcumin Encapsulation in Multilayer Oil-in-Water Emulsion: Synthesis Using Ultrasonication and Studies on Stability and Antioxidant and Release Activities. *Langmuir*, 35, 10866-10876. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01523
- Castromonte, M., Wacyk, J. & Valenzuela, C. (2020). Encapsulación de extractos antioxidantes desde sub-productos agroindustriales: una revisión. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(5), 836-847. DOI: 10.4067/s0717-75182020000500836
- Chaabane, D., Yakhdane, A., Vatai, G., Koris, A. & Nath, A. (2022). Microencapsulation of Olive Oil: A Comprehensive Review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(3), 354-366. DOI: 10.3311/PPCh.19587
- Chang, D., Hayat, K., Abbas, S. & Zhang, X. (2019). Ascorbic acid encapsulation in a glassy carbohydrate matrix via hot melt extrusion: Preparation and characterization. *Food Science and Technology*, 39(3), 660-666. DOI: 10.1590/fst.02918

- Choi, M. G., Briancon, S., Andrieu, J., Min, S. G. & Fessi, H. (2004). Effect of freeze-drying process conditions on the stability of nanoparticles. *Drying Technology*, 22, 335-346. DOI: 10.1081/DRT-120028238?journalCode=ldrt20
- Complementos Alimenticios S.A. DE C.V. Disponible en línea: <https://www.complementosalimenticios.com> (consultado el 28 de junio de 2022).
- CRISOL, S.A. de C.V.: DICLAB. Soportes universales. Soporte universal con varilla AESA. Disponible en línea: <https://elcrisol.com.mx> (consultado 29 de junio de 2022).
- Dammak, I., Luciano, C. G., Pérez-Córdoba, L. J., Monteiro, M. L., Conte-Junior, C. A. & Amaral Sobral, P. J. (2021). Advances in biopolymeric active films incorporated with emulsified lipophilic compounds: a review. *Royal Society of Chemistry Advances*, 11, 28148-28168. DOI: 10.1039/d1ra04888k
- Díaz-Montes, E., Martínez Hernández, J. A., Cerón-Montes, G. I. & Vargas-León, E. A. (2022). Transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), 84-93. DOI: 10.29057/icbi.v10i19.8896
- Díaz-Montes, E., Vargas-León, E. A., Garrido-Hernández, A. & Cerón-Montes, G. I. (2021). Simulación de la transferencia de calor en el contenedor de alimentación del secador por aspersión y su control de temperatura. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(Especial2), 168-173. DOI: 10.29057/icbi.v9iEspecial2.7947
- DILAC: Dilac S.A de C.V. Disponible en línea: <https://www.dilac.com.mx> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Đorđević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., Kostić, I., Komes, D., Bugarski, B. & Nedović, V. (2015). Trends in Encapsulation Technologies for Delivery of Food Bioactive Compounds. *Food Engineering Reviews*, 7, 452-490. DOI: 10.1007/s12393-014-9106-7
- Eckert, C., Agnol, W. D., Dallé, D. Serpa, V. G., Maciel, M. J., Lehn, D. N. & de Souza, C. F. V. (2018). Development of alginate-pectin microparticles with dairy whey using vibration technology: Effects of matrix composition on the protection of *Lactobacillus* spp. from adverse conditions. *Food Research International*, 113, 65-73. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.07.001
- El-Messery, T. M., El-Said, M. M., Demircan, E. & Ozelik, B. (2019). Microencapsulation of natural polyphenolic compounds extracted from apple peel and its application in yoghurt. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 18(1), 25-34. DOI: 10.17306/J.AFS.2019.0597
- Enciso-Sáenz, S., Borrás-Enriquez, A. J., Ventura-Canseco, L. M. C., Gutiérrez-Miceli, F., Dendooven, L., Grajales-Lagunes, A., Ruiz-Cabrera, M. A., Ruiz-Valdiviezo, V. & Abud Archila, M. (2018). Lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf) Essential oil encapsulation by spray-drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(2), 407-420. DOI: 10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Enciso
- Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chhanwal, N. & Anandharamkrishnan, C., (2013). Nanoencapsulation Techniques for Food Bioactive Components: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 628-647. DOI: 10.1007/s11947-012-0944-0
- FALANX. Disponible en línea: <https://www.falanx.com.mx> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Fang, Z. & Bhandari, B. (2012). Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredients and nutraceutical encapsulation. En Garti, N. & McClements, D. J. *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals*, pp. 73-109. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited. ISBN 9780857091246
- Favaro-Trindade, C. S., de Matos Junio, F. E., Okuro, P. K., Dias-Ferreira, J., Cano, A., Severino, P., Zielińska, A. & Souto, E. B. (2021). Encapsulation of Active Pharmaceutical Ingredients in Lipid Micro/Nanoparticles for Oral Administration by Spray-Cooling. *Pharmaceutics*, 13(8), 1186. DOI: 10.3390/pharmaceutics13081186
- Forstinus Nwabor, O., Singh, S., Marlina, D. & Piyawan Voravuthikunchai, S. (2020). Chemical characterization, release, and bioactivity of *Eucalyptus camaldulensis* polyphenols from freeze-dried sodium alginate and sodium carboxymethyl cellulose matrix. *Food Quality and Safety*, 4(4), 203-212. DOI: 10.1093/fqsafe/fyaa016
- Gan, R.-Y., Chan, C.-L., Yang, Q.-Q., Li, H.-B., Zhang, D., Ge, Y.-Y., Gunaratne, A., Ge, J. & Corke, H. (2019). Bioactive compounds and beneficial functions of sprouted grains. En Feng, H., Nemzer, B. & DeVries, J. W. *Sprouted Grains: Nutritional Value, Production and Applications*, pp. 191-246. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128115251
- González-Ortega, R., Faieta, M., Di Mattia, C. D., Valbonetti, L. & Pittia, P. (2020). Microencapsulation of olive leaf extract by freeze-drying: Effect of Carrier composition on process efficiency and technological properties of the powders. *Journal of Food Engineering*, 285, 110089. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110089
- González, S. (2020). Dietary Bioactive Compounds and Human Health and Disease. *Nutrients*, 12(2), 348. DOI: 10.3390/nu12020348
- Guo, H. & Xia, M. (2018). Anthocyanins and Diabetes Regulation. En Watson, R.R., Preedy, V. R. & Zibadi, S. *Polyphenols: Mechanisms of Action in Human Health and Disease*, pp. 135-145. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128130063
- Guo, J., Kong, L. & Xu, B. (2020). Microencapsulation of Curcumin by Spray Drying and Freeze Drying. *LWT – Food Science and Technology*, 132, 109892. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109892
- IKA: Designed for scientists. Dispersores. *Ultra-Turrax T50*. Disponible en línea: <https://www.ika.com/es> (consultado el 28 de junio de 2022)
- Jemaa, M. B., Falleh, H. & Ksouri, R. (2019). Encapsulation of Natural Bioactive Compounds: Nanoemulsion Formulation to Enhance Essential Oils Activities. En Salaün, F. *Microencapsulation - Processes, Technologies and Industrial Applications*, pp. 1-15. London, UK: Intech Open. ISBN 9781838818708
- JOBARI: Colors and Flavors. Disponible en línea: <https://www.jobari.com> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Jordán-Suárez, O., Glorio-Paulet, P. & Vidal, L. (2021). Optimization of processing parameters for the microencapsulation of soursop (*Annona muricata* L.) leaves extract: Morphology, physicochemical and antioxidant properties. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 161-168. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2021.018
- Jovanović, A. A., Lević, S. M., Pavlović, V. B., Marković, S. B., Pjanović, R. V., Đorđević, V. B., Nedović, V. & Bugarski, B. M. (2021). Freeze versus Spray Drying for Dry Wild Thyme (*Thymus serpyllum* L.) Extract Formulations: The Impact of Gelatin as a Coating Material. *Molecules*, 26, 3833. DOI: 10.3390/molecules26133933
- Kakran, M. & Antipina, M. N. (2014). Emulsion-based techniques for encapsulation in biomedicine, food and personal care. *Current Opinion in Pharmacology*, 18, 47-55. DOI: 10.1016/j.coph.2014.09.003
- Kamiloglu, S., Tomas, M., Ozdal, T., Yolci-Omeroglu, P. & Capanoglu, E. (2021). Bioactive component analysis. En Galanakis, C. M. *Innovative Food Analysis*, pp. 41-65. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128194935
- Kathiman, M. N., Mudalip, S. K. A. & Gimbin, J. (2020). Effect of encapsulation agents on antioxidant activity and moisture content of spray dried powder from Mahkota Dewa fruit extract. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 991, 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/991/1/012040
- Kerksick, C. M., Wilborn, C. D., Roberts, M. D., Smith-Ryan, A., Kleiner, S. M., Jäger, R., Collins, R., Cooke, M., Davis, J. N., Galvan, E., Greenwood, M., Lowery, L. M., Wildman, R., Antonio, J. & Kreider, R. B. (2018). *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15:38, 1-57. DOI: 10.1186/s12970-018-0242-y
- Khor, C. M., Ng, W. K., Kanaujia, P., Chan, K. P. & Dong, Y. (2017). Hot-melt extrusion microencapsulation of quercetin for taste-masking. *Journal of Microencapsulation*, 34(1), 29-37. DOI: 10.1080/02652048.2017.1280095
- Krisanti, E. A., Safiya, A. & Mulia, K. (2019). Formulation and characterization of chitosan-alginate freeze dried matrices loaded with oleoresin extract of red ginger. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 703, 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012008
- Kunes, M. & Kvetina, J. (2016). Probiotics: Preclinical Testing for Verification of Their Gastrointestinal Effectiveness. En Gupta, R. C. *Nutraceuticals*, pp. 799-810. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128021477
- LABCONCO: Laboratory Equipment. Secadores por congelación. *Liofilizador de sobremesa 4.5 L*. Disponible en línea: <https://www.labconco.com> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Leyva-Jiménez, F. J., Lozano-Sánchez, J., Cádiz-Gurrea, M. L., Fernández-Ochoa, A., Arráez-Román, D. & Segura-Carretero, A. (2020). Spray-Drying Microencapsulation of Bioactive Compounds from Lemon Verbena Green Extract. *Foods*, 9, 1547. DOI: 10.3390/foods9111547
- LioMex. Disponible en línea: <https://liomex.com>
- Lucía, C., Marcela, F. & Ainhoa, L. (2017). Encapsulation of Almond Essential Oil by Co-Extrusion/ Gelling Using Chitosan as Wall Material. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 7, 67-74. DOI: 10.4236/jeas.2017.71004
- Mangiring, G. A., Pratami, D. K., Hermansyah, H., Wijanarko, A., Rohmatin, E. & Sahlan, M. (2018). Microencapsulation of Ethanol Extract Propolis By Maltodextrin and Freeze-Dried Preparation. *AIP Conference Proceedings*, 1933, 020012. DOI: 10.1063/1.5023946
- Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D. S., González, Z. & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-

- products for food application – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11-23. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.07.009
- Marín-Peñalver, D., Alemán, A., Montero, A. P. & Gómez-Guillén, C. (2021). Entrapment of natural compounds in spray-dried and heat-dried iota-carrageenan matrices as functional ingredients in surimi gels. *Food & Function*, 12, 2137-2147. DOI: 10.1039/d0fo02922j
- Marín, D., Alemán, A., Montero, P. & Gómez-Guillén, M. C. (2017). Encapsulation of food waste compounds in soy phosphatidylcholine liposomes: effect of freeze-drying, storage stability and functional aptitude. *Journal of Food Engineering*, 223, 132-143. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.12.009
- Medina-Pérez, G., Estefes-Duarte, J. A., Afanador-Barajas, L. N., Fernández-Luqueño, F., Zepeda-Velázquez, A. P., Franco-Fernández, M. J., Peláez-Acero, A. P. & Campos-Montiel, R. G. (2020). Encapsulation Preserves Antioxidant and Antidiabetic Activities of Cactus Acid Fruit Bioactive Compounds under Simulated Digestion Conditions. *Molecules*, 25(23), 5736. DOI: 10.3390/molecules25235736
- Micanquer-Carlosama, A., Serna-Cock, L. & Ayala-Aponte, A. (2017). Double emulsion and complex coacervation in Stevia encapsulation. *VITAE, Revista de la Facultad de las Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*, 24(3), 167-177. DOI: 10.17533/udea.vitae.v24n3a02
- Miller, D. D., Li, T. & Liu, R. H. (2014). Antioxidants and Phytochemicals. En Miller, D. D. *Reference Module in Biomedical Sciences*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780128012383
- Muangratm R., Ravichai, K. & Jirattananangrsri, W. (2019). Encapsulation of polyphenols from fermented wastewater of Miang processing by freeze drying using a maltodextrin/gum Arabic mixture as coating material. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(4). DOI: 10.1111/jfpp.13908
- Mudrić, J., Šavikin, K., Ibrić S. & Đuriš J. (2019). Double emulsions (W/O/W emulsions): Encapsulation of plant bioactives. *Lekovite sirovine*, 39, 76-83. DOI: 10.5937/leksi1939076M
- Natfruit® México. Disponible en línea: <https://www.natfruit.com>
- Navarro-Flores, M. J., Ventura-Canseco, L. M. C., Meza-Gordillo, R., Ayora-Talavera, T. R. & Abud-Archila, M. (2020). Spray drying encapsulation of a native plant extract rich in phenolic compounds with combinations of maltodextrin and non-conventional wall materials. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 4111-4122- DOI: 10.1007/s13197-020-04447-w
- Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S. & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1, 1806-1815. DOI: 10.1016/j.profoo.2011.09.265
- Neves, M. I. L., Desobry-Banon, S., Perrone, I. T., Desobry, S. & Petti, J. (2019). Encapsulation of curcumin in milk powders by spray-drying: Physicochemistry, rehydration properties, and stability during storage. *Powder Technology*, 345, 601-607. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.049
- Nogueira, M. B., Prestes, C. F., Burkert, J. F. M. (2017). Microencapsulation by lyophilization of carotenoids produced by *Phaffia rhodozyma* with soy protein as the encapsulating agent. *Food Science and Technology (Campinas)*, 37(Special issue), 1-4. DOI: 10.1590/1678-457X.05417
- Ogrodowska, D., Tańska, M., Brandt, W. & Czaplicki, S. (2020). Impact of the Encapsulation Process by Spray- and Freeze-Drying on the Properties and Composition of Powders Obtained from Cold-Pressed Seed Oils with Various Unsaturated Fatty Acids. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 70(3), 241-252. DOI: 10.31883/pjfn/120314
- Ohtake, S., Izutsu, K.-I. & Lechuga-Ballesteros, D. (2020). *Drying Technologies for Biotechnology and Pharmaceutical Applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. ISBN 9783527341122
- Olivares, A., Silva, P. & Altamirano, C. (2017). Microencapsulation of probiotics by efficient vibration technology. *Journal of Microencapsulation*, 34 (7), 667-674. DOI: 10.1080/02652048.2017
- Ozkan, G., Kostka, T., Esatbeyoglu, T. & Capanoglu, E. (2020). E Effects of Lipid-Based Encapsulation on the Bioaccessibility and Bioavailability of Phenolic Compounds. *Molecules*, 25(23), 5545; DOI: 10.3390/molecules25235545
- Pashazadeh, H., Zannou, O., Ghellam, M., Koca, I., Galanakis, C. M. & Aldawoud, T. M. S. (2021). Optimization and Encapsulation of Phenolic Compounds Extracted from Maize Waste by Freeze-Drying, Spray-Drying, and Microwave-Drying Using Maltodextrin. *Foods*, 10, 1396. DOI: 10.3390/foods10061396
- Paulo, F., Paula, V., Estevinho, L. M. & Santos, L. (2021). Propolis microencapsulation by double emulsion solvent evaporation approach: Comparison of different polymeric matrices and extract to polymer ratio. *Food and Bioprocess Processing*, 127, 408-425. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.03.019
- PILSAC: Productos Industriales de León S.A de C.V. Disponible en línea: <http://www.pilsac.com.mx> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Pudziuvelyte, L., Marksa, M., Sosnowska, K., Winnicka, K., Morkuniene, R. & Berbatoniene, J. (2020). Freeze-Drying Technique for Microencapsulation of *Elsholtzia ciliata* Ethanolic Extract Using Different Coating Materials. *Molecules*, 25(9), 2237. DOI: 10.3390/molecules25092237
- Pulit-Prociak, J., Kabat, M., Węgrzyn, E., Zielina, M. & Banach, M. (2019). Encapsulation of antioxidant compounds in biopolymer micelles. *Chemical Engineering Communications*, 207(3), 393-412. DOI: 10.1080/00986445.2019.1602526
- Rajam, R. & Subramanian, P. (2022). Encapsulation of probiotics: past, present and future. *Beni-Suef University Journal of basic and Applied Sciences*, 11, 46. DOI: 10.1186/s43088-022-00228-w
- Ratnavathi, C. V. (2019). Grain Structure, Quality, and Nutrition. En Visarada, K. B. R. S., Venkatesh Bhat, B. & Tonapi, V.A. *Breeding Sorghum for Diverse End Uses*, pp. 193-207. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780081018798.
- Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z. & Askari, G. (2019). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Drying Technology*, 1-25. DOI: 10.1080/07373937.2019.1653906
- 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. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106029
- Sankarikutty, B. & Narayanan, C. S. (2003). Essential oils: Isolation and Production. En Caballero, B. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 2185-2189. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780122270550
- Santana Aguiar, M. C., Graças Fernandes da Silva, M. F., Batista Fernandes, J. & Rossi Forim, M. (2020). Evaluation of the microencapsulation of orange essential oil in biopolymers by using a spray-drying process. *Scientific Reports*, 10, 11799. DOI: 10.1038/s41598-020-68823-4
- Santos, D. I., Alexandre Saraiva, J. M., Vicente, A. A. & Moldão-Martins, M. (2019). Methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds and nutrients. En Barba, F. J., Alexandre Saraiva, J. M., Cravotto, G. & Lorenzo, J. M. *Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds*, pp. 23-54. Elsevier Inc: Amsterdam, The Netherlands. ISBN 97810128141748
- Scopus: Elsevier, B.V. Disponible en línea: <https://www.scopus.com> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Serna-Cock, L. & Vallejo-Castillo, V. (2013). Probiotic encapsulation. *African Journal of Microbiology Research*, 7(40), 4743-4753. DOI: 10.5897/AJMR2013.5718
- Shaaban, H. A. & Farouk, A. (2022). Encapsulation of Essential Oils and Their Use in Food Applications. En Santana de Oliveira, M. *Essential Oils - Advances in Extractions and Biological Applications*, pp. 1-16. ISBN 9781803557540
- Silva, P. M., Tulini, F. L., Martins, E., Penning, M., Fávoro-Trindade, C. S. & Poncelet, D. (2018). Comparison of extrusion and co-extrusion encapsulation techniques to protect *Lactobacillus acidophilus* LA3 in simulated gastrointestinal fluids. *LWT – Food Science and Technology*, 89, 392-399. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.11.008
- Silveira Rodríguez, M. B., Monereo Megías, S. & Molina Baena, B. (2003). Alimentos funcionales y nutrición óptima: ¿Cerca o lejos?. *Revista Española de Salud Pública*, 77(3), 317-331. ISSN 21739110
- SioSi. Disponible en línea: <https://es.siosi.com.mx> (consultado el 28 de junio de 2022).
- Stasse, M., Ribaut, T., Schmitt, V. & Héroguez, V. (2019). Encapsulation of lipophilic fragrance by polymerization of the intermediate aqueous phase of an oil-in-water-in-oil (O/W/O) double emulsion. *Polymer Chemistry*, 10(3), 4154-4162. DOI: 10.1039/c9py00528e
- Suyanto, A., Noor, E., Rusli, M. S. & Fahma, F. (2019). Nano-Emulsion and Nano-Encapsulation of Fruit Flavor: Review. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 292, 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/292/1/012025
- Tessaro, L., Martelli-Tosi, M. & Sobral, P. J. A. (2022). Development of W/O emulsion for encapsulation of “Pitanga” (*Eugenia uniflora* L.) leaf hydroethanolic extract: droplet size, physical stability and rheology. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, e65320. DOI: 10.1590/fst.65320
- Tolve, R., Galgano, F., Caruso, M. C., Tchenbou-Magaia, F. L., Condelli, N., Favati, F. & Zhang, Z., (2016). Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 67(8), 888-918. DOI: 10.1080/09637486.2016.1205552
- Tripathy, S., Verma, D. K., Thakur, M., Patel, A. R., Srivastav, P. P., Singh, S., Chávez-González, M. L. & Aguiar, C. N. (2021). Encapsulated Food

- Products as a Strategy to Strengthen Immunity Against COVID-19. *Frontiers in Nutrition*, 8, 673174. DOI: 10.3389/fnut.2021.673174
- Trugo, L. C., von Baer, D. & von Baer, E. (2003). Lupin. En Caballero, B. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, pp. 3623-3629. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. ISBN 9780122270550
- Vos, P., Faas, M. M., Spasojevic, M., & Sikkema, J. (2010). Review: Encapsulation for preservation of functionality and targeted delivery of bioactive food components. *International Dairy Journal*, 20, 292-302. DOI: 10.1016/j.idairyj.2009.11.008
- Xin, X., Essien, S., Dell, K., Woo, M. W. & Baroutian, S. (2022). Effects of Spray-Drying and Freeze-Drying on Bioactive and Volatile Compounds of Smoke Powder Food Flavouring. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 785-794. DOI: 10.1007/s11947-022-02779-3
- Yamashita, C., Chung, M. M. S., dos Santos, C., Malacrida Mayer, C. R., Freitas Moraes, I. C. & Branco, I. G. (2017). Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus* spp.) by-product extract by freeze-drying. *LWT – Food Science and Technology*, 84, 256-262. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.05.063
- Yorde Erem, S. (2014). Cómo lograr una vida saludable. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 27(1), 129-142. ISSN 0798-0752