

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Micro y nano encapsulación de fitoesteroles y omega-3 en la
producción de alimentos funcionales: una revisión bibliográfica.**

**María José Dávila Jiménez
María Paula Granja Salazar
Veridian Salomé Zambrano Suárez**

Ingeniería en Alimentos

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero en Alimentos.

Quito, 16 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Micro y nano encapsulación de fitoesteroles y omega-3 en la producción de alimentos funcionales: una revisión bibliográfica.

**María José Dávila Jiménez
María Paula Granja Salazar
Veridian Salomé Zambrano Suárez**

Nombre del profesor, Título académico

Javier Garrido Espinosa, Máster

Quito, 16 de diciembre de 2020

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y Apellidos: María José Dávila Jiménez

Código: 00135963

Cédula de identidad: 1724761083

Nombres y Apellidos: María Paula Granja Salazar

Código: 00136429

Cédula de identidad: 1003544028

Nombres y Apellidos: Veridian Salomé Zambrano Suárez.

Código: 00138579

Cédula de identidad: 1750307710

Lugar y fecha: Quito, 16 de diciembre de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El Omega-3 y los fitoesteroles son lípidos ampliamente usados en la elaboración de alimentos funcionales por sus propiedades benéficas para el cuerpo humano. Sin embargo, su uso representa un desafío para el desarrollo de nuevos productos alimenticios, debido a que estas sustancias bioactivas son inestables y alteran las características organolépticas y sensoriales de los productos. La micro y nano encapsulación son técnicas que facilitan la incorporación de compuestos lipídicos al recubrirlos con diversos materiales que forman microesferas. Esto permite protegerlos, dar estabilidad, reducir la oxidación lipídica y enmascarar aromas o sabores no deseados en el producto final. En la presente revisión bibliográfica se discuten los principales beneficios funcionales y tecnológicos de la micro y nano encapsulación de fitoesteroles y omega-3, considerando los principales métodos y materiales de recubrimiento utilizados en estudios previos.

Palabras Clave: Microencapsulación, omega-3, alimentos funcionales, fitoesteroles, lípidos.

ABSTRACT

Omega-3 and phytosterols are lipids widely used to obtain functional foods due to their beneficial attributes for the human body. However, their use represents a challenge for the development of new food products since these bioactive substances are unstable and modify the organoleptic and sensory characteristics of the products. Micro and nano encapsulation are techniques that facilitate the incorporation of lipid compounds by coating them with various materials that form microspheres. This makes it possible to protect them, stabilize them, reduce lipid oxidation and mask undesired aromas or flavors in the final product. In this bibliographic review, the main functional and technological benefits of micro and nano encapsulation of phytosterols and omega-3 are discussed, considering the main coating methods and materials used in previous studies.

Key Words: Microencapsulation, omega-3, functional foods, phytosterols, lipids.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
Metodología	13
Definición Del Problema	13
Propuesta.....	13
Búsqueda De La Información	14
Organización De La Información	15
Resultados Y Discusión	18
Métodos Más Utilizados	22
Spray Drying O Secado Por Aspersión.....	22
Coacervación Compleja.....	23
Freeze Drying.....	24
Recopilación De Resultados Sensoriales, Nutricionales Y Físicoquímicos De Los Artículos Seleccionados.....	25
Conclusiones	30
Referencias.....	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda utilizadas en la investigación	14
Tabla 2. Conteo de publicaciones desglosado por la fuente de información.....	15
Tabla 3. Resumen de artículos de revistas para encapsulación de omega-3.....	18
Tabla 4. Resumen de artículos de revistas para encapsulación de fitoesteroles	20

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicaciones por año	15
Figura 2. Recopilación y almacenamiento de la información mediante la herramienta web importer medeley	16
Figura 3. Organización de la información por medio de la herramienta mendeley reference manager.....	17

INTRODUCCIÓN

La microencapsulación es un procedimiento donde componentes bioactivos son inmovilizados por polímeros en estructuras pequeñas como microcápsulas, microesferas o micropartículas. Esta técnica se la considera como un “embalaje” pequeño con el fin de proteger un componente bioactivo que se encuentra en estado líquido, sólido o gaseoso (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Las microcápsulas tienen dos componentes: una cápsula o material de recubrimiento y el núcleo o ingrediente activo. El material de recubrimiento permite la protección contra agentes externos como oxígeno, luz, humedad, entre otros, esto proporciona estabilidad, mejores condiciones de manejo y aceptabilidad (Kaushik et al., 2015).

Existen algunos métodos de micro y nano encapsulación tales como coacervación compleja, spray drying o secado por aspersion, homogeneización de alta presión, emulsión seguida de granulación por pulverización, secado por congelación, por atomizador ultrasónico (Comunian & Favaro-Trindade, 2016), suspensión neumática, técnicas de evaporación de disolventes, recubrimiento de sartén y polimerización (Ayoub et al., 2019). Para los materiales de recubrimiento o de pared generalmente se utiliza proteína aislada, caseinato de sodio, maltodextrina y quitosano, estos polímeros deben presentar una estabilidad, rentabilidad y protección del componente bioactivo que se quiere encapsular. Además, estos materiales ayudan a tener buenas características sensoriales (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Los materiales principalmente utilizados son compuestos lipofílicos gracias a sus propiedades emulsificantes, filmógenas y su alta capacidad de unión (Tolve et al., 2018). Uno de los métodos más utilizados es spray drying, esto se debe a que se encuentra en un precio accesible, es simple y flexible (Geranpour, Assadpour, Mahdi, 2020).

Los lípidos son moléculas no solubles en agua, pero sí en disolventes orgánicos (Kecpzyński & Róg, 2016). Estos macronutrientes esenciales son la principal fuente de energía que se almacena en el cuerpo, tienen funciones estructurales y celulares, regulan la temperatura y protegen a los órganos. Los lípidos se hallan en grasas, aceites, carnes, productos lácteos y plantas, y son consumidos generalmente en forma de triglicéridos (Morris & Mohiuddin, 2020). Esta revisión bibliográfica se enfoca en dos tipos de lípidos, los ácidos grasos y los fitoesteroles debido a las propiedades beneficiosas que ejercen en la salud humana.

La estructura de un ácido graso está constituida por una cadena alifática y un grupo carboxílico y son los principales constituyentes de los lípidos. Estos se clasifican en saturados e insaturados, siendo estos últimos inestables debido a que contienen dobles enlaces. Existen algunos tipos de ácidos grasos insaturados, no obstante, los que pertenecen al grupo omega-3 destacan gracias al efecto positivo que ejercen en la salud humana (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Estos son parte de los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) que se caracterizan por tener varios dobles enlaces. En el tercer carbono comenzando por el extremo metilo, se sitúa el primer enlace doble (Kaushik et al., 2015).

Dentro de los omega-3 (PUFA) se encuentra el ácido docosahexaenoico (DHA; 22: 6 omega-3), ácido estearidónico (SDA; 18: 4 omega-3), ácido α -linolénico (ALA; 18: 3 omega-3), ácido docosapentaenoico (DPA; 22: 5 omega-3) y ácido eicosapentaenoico (EPA; 20: 5 omega-3). El DHA y el EPA presentan una cadena larga lo cual implica que tienen un mayor efecto positivo en la salud. Estos se pueden obtener de los lípidos corporales de pescados grasos, el hígado de los pescados blancos magros y la grasa de mamíferos marinos (Shahidi, & Ambigaipalan, 2018). Similarmente, el omega-3 también se encuentra en fuentes vegetales como en el aceite de semilla de echium, aceite de chía, entre otros (Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

Por otro lado, los esteroides están compuestos por tres anillos de seis carbonos y un anillo de cinco carbonos unidos a una cadena alifática y un grupo hidroxilo en el carbono 3 del anillo. Los esteroides también pueden ser de origen animal (zoo esteroles, como colesterol o coprostanol) y de origen vegetal (fitoesteroides). Los fitoesteroides son componentes naturales de las paredes celulares de las plantas. Se han identificado 250 moléculas de fitoesteroides, entre las cuales el β -sitosterol es el fitoesteroles más abundante junto con el campesterol y el estigmasterol (Gies et al., 2020).

Un incremento del interés por productos saludables ha dado paso al desarrollo de alimentos funcionales. Estos contienen compuestos diferenciados que permiten mejorar las funciones biológicas del cuerpo humano y, además, ayudan a la prevención de enfermedades degenerativas (Arias et al., 2018).

Las propiedades funcionales del omega-3 se basan en sus efectos de prevención de enfermedades como hipertensión, artritis, diabetes y enfermedades coronarias (Kaushik et al., 2015). Además, es de mucho interés por su capacidad de reducción de triglicéridos (Comunian & Favaro-Trindade, 2015).

Por otro lado, los fitoesteroides ayudan a reducir la absorción intestinal de colesterol y colaboran en mantener saludable e íntegra a la membrana de este. También reducen el riesgo de enfermedades cardiovasculares y previenen el cáncer (Comunian & Favaro-Trindade, 2015).

La técnica de encapsulación permite incorporar componentes en los alimentos de manera más controlada, reduce la reactividad de los componentes, disminuye la oxidación lipídica, enmascaramiento de sabor y aroma a pescado y, facilita su incorporación en alimentos con formulación acuosa como bebidas; pues tanto el omega-3 como los fitoesteroides son hidrofóbicos (Comunian & Favaro-Trindade, 2015).

El objetivo de esta revisión bibliográfica es recopilar estudios sobre micro y nano encapsulación de fitoesteroles y omega-3, enfocada en los beneficios funcionales y ventajas tecnológicas en la producción de alimentos.

METODOLOGÍA

La presente revisión bibliográfica comprende el periodo desde el año 2013 hasta el año 2020. Se emplearon las bases de datos en línea Elsevier-Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>), National Center for Biotechnology Information (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), Research Gate (<https://www.researchgate.net/>) y Springer (<https://www.springer.com/la>). Para la gestión documental se utilizó Mendeley Desktop como software de apoyo que permite almacenar el material bibliográfico, facilitando la incorporación de citas y referencias en el documento.

Definición del problema

La aterosclerosis es una de las mayores causas que conlleva al desarrollo de enfermedades cardiovasculares debido a la acumulación de Colesterol LDL en las arterias (Gisterå, & Hansson, 2017). Según la OMS, las enfermedades cardiovasculares son la razón de defunción principal a nivel mundial. En el 2030 se espera que aproximadamente 23.6 millones de personas fallezcan por alguna de estas enfermedades, por lo que seguirá siendo la causa número uno de muertes (OMS, 2020). El consumo de omega-3 y fitoesteroles reduce el riesgo de padecer estas y otras enfermedades, pero su incorporación en los alimentos representa un desafío para la industria, debido a que son compuestos bioactivos inestables y alteran las características organolépticas y sensoriales de los productos.

Propuesta

La propuesta de esta revisión bibliográfica es reunir información sobre las técnicas de micro y nano encapsulación de omega-3 y fitoesteroles como solución a la problemática

tecnológica que existe en la industria alimenticia, para el desarrollo de alimentos funcionales que mejoren la salud de los consumidores y contribuyan a la prevención de enfermedades.

Búsqueda de la información

La búsqueda de información se limitó a investigaciones en inglés y español a partir del año 2013 hasta el año 2020.

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda utilizadas en la investigación

Ecuaciones de búsqueda	Base de datos	Resultados
<i>Microencapsulation of fatty acids</i>	ScienceDirect	1837
<i>Microencapsulation of omega-3</i>	ScienceDirect	792
<i>Microencapsulation AND omega-3</i>	ScienceDirect	772
<i>Microencapsulation of fatty acids</i>	Scopus	281
<i>Microencapsulation AND phytosterols</i>	ScienceDirect	261
<i>Microencapsulation AND omega-3</i>	Springer	145
<i>Omega 3 fatty acids</i>	NCBI Books	128
<i>Microencapsulation AND phytosterols</i>	Springer	71
Total		4287

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se presenta el número de resultados hallados a partir de 8 ecuaciones de búsqueda de información, relacionadas con el objetivo de la revisión bibliográfica.

Organización de la información

Tabla 2. Conteo de publicaciones desglosado por la fuente de información

Material informativo	Base De Datos	Revista o Editorial	
Artículo científico	Pubmed	Annual Review of Food Science and Technology	1
		Nature Reviews Nephrology	1
	Research Gate	Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry	1
	Royal Society of ch..	Food and Function	1
	Scielo	Food Science and Technology	1
		Revista Tecnura	1
	ScienceDirect	American Journal of Food Science and Nutrition ..	1
		Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomemb..	1
		Food Chemistry	2
		Food Hydrocolloids	1
		Food Research International	3
		International Journal of Biological Macromolecules	2
		Journal of Food Engineering	2
		Journal of Functional Foods	4
		LWT	4
		Powder Technology	1
		Trends in Food Science & Technology	1
	Springer	Food and Bioprocess Tecnology	2
	Libro	NCBI	StatPearls
Página Web	OMS	Nulo	1

Observaciones: El término “Nulo” en la última fila se debe a que el material fue publicado en un sitio web

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se observa que, de los 32 documentos consultados, 30 son artículos científicos, 1 corresponde a un libro y 1 a una página web. La base de datos más utilizada fue Science Direct con 11 artículos, seguida de Springer con 2. La revista más consultada fue Journal of Functional Foods. Esta clasificación proporciona una perspectiva más clara de la base de investigación de la presente revisión.



Figura 1. Número de publicaciones por año

La Figura 1 muestra la clasificación de las 32 publicaciones empleadas en esta etapa de la metodología por año. La mayoría de artículos fueron publicados en 2020, seguidos por publicaciones de 2018 y 2017, lo que implica que la información empleada en la revisión es actual.

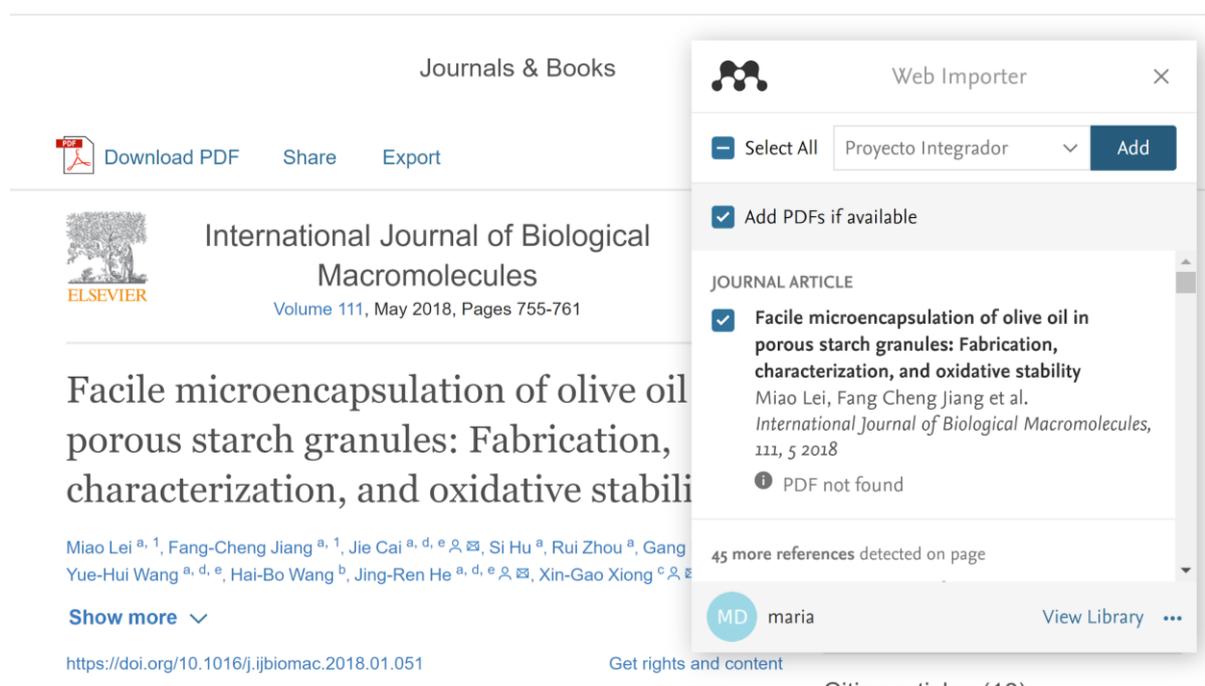


Figura 2. Recopilación y almacenamiento de la información mediante la herramienta Web Importer Mendeley

En la Figura 2 se observa una captura de pantalla de la aplicación de la herramienta Web Importer de Mendeley para recopilar y archivar los artículos científicos. Esta herramienta facilitó la incorporación de las fuentes bibliográficas usadas, directamente desde la fuente electrónica en la que se encontraba el artículo hacia una biblioteca personalizada.

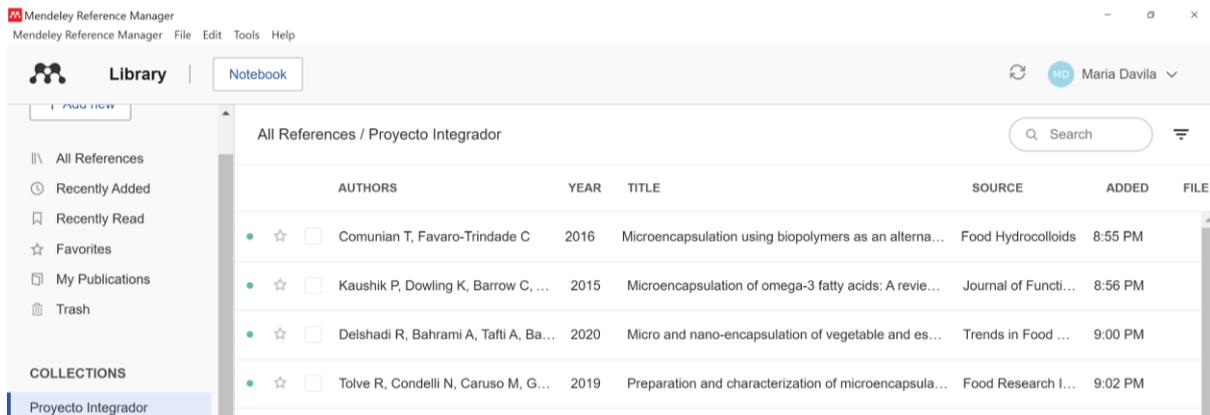


Figura 3. Organización de la información por medio de la herramienta Mendeley Reference Manager

Para una mejor organización de la información se utilizó la herramienta Mendeley Reference Manager. Esta herramienta permitió crear una biblioteca específica para el proyecto integrador como se observa en la Figura 3. En esta biblioteca se puede visualizar una síntesis de los archivos almacenados que incluye su año de publicación, autores, título y fuente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3. Resumen de artículos de revistas para encapsulación de omega-3

Objetivo (que encapsulan)	Método y tipo cobertura	Resultados	Referencia
Investigar cómo influye la goma arábica/gelatina en la formación de microcápsulas de aceite de jengibre.	Coacervación compleja y coacervación compleja por atomización con gelatina y goma arábica.	La emulsión fue estable en el proceso, no presenta separación de fases permitiendo formar las cápsulas, las porciones de gomas afectaron en la morfología de las cápsulas.	(Ferreira & Regina, 2020).
Microencapsular aceite de atún y vitaminas para mejorar la estabilidad oxidativa.	Coacervación compleja y cross-linking con gelatina y hexametáfosfato de sodio.	El tamaño de partícula varió entre 50 a 80 μm . Se obtuvo una eficiencia de encapsulación del 99.84%.	(Wang, Vongsvivut, Adhikari & Barrow, 2015).
Fortificar yogurt con aceite de pescado y evaluar propiedades sensoriales y retención de aceite encapsulado.	Atrapamiento en liposomas - bicapas fosfolípídicas de lecitina y aceite de girasol.	Aumento de estabilidad de DHA y EPA. Reducción de cantidad de peróxido y acidez.	(Ghorbanzade et al., 2017).
Enriquecer un producto cárnico frito con omega-3 y medir sus características en almacenamiento.	Spray drying con quitosano-lecitina y maltodextrina.	El almacenamiento en congelación presentó un aumento en la oxidación. No hubo diferencia significativa en la evaluación sensorial.	(Jiménez, Pérez, Ruiz & Antequera, 2015).

Encapsular omega-3 y astaxantina del salmón y medir el rendimiento.	Proceso PGSS (particles from gas saturated solutions), con PEG (polietilenglicol).	79.2% de rendimiento de encapsulación. Protección contra daños oxidativos.	(Haq & Chun, 2018).
Fortificación de helados mediante microencapsulación de PUFA de aceite de pescado de carpa plateada.	Spray drying, con cobertura 1:2 almidón modificado: maltodextrina.	Incremento en el contenido de grasa y sólidos no grasos. Nivel de aceptación propicio para el helado sabor chocolate.	(Nawas et al., 2017).
Producir una forma estabilizada de aceite de oliva mediante microencapsulación para prolongar su vida útil.	Emulsión, secado y triturado; con cobertura de almidón poroso de camote morado.	Mejóro significativamente la estabilidad en cuanto a oxidación lipídica del aceite de oliva.	(Lei et al., 2018)
Evaluar la estabilidad del aceite de almendra mediante la microencapsulación.	Spray drying, usando agregados esféricos de almidón de taro como material de pared.	Se observó una protección contra las reacciones de oxidación.	(Hoyos-Leyva et al., 2019).
Analizar los cambios que ocurren en el aceite de sacha inchi en la estructura libre y microencapsulada cuando se somete a condiciones gástricas.	Sistemas basados en emulsión que utilizan ovoalbúmina (Ova), pectina (Pec) y goma xantana (XG), seguido de Freeze drying.	Liberación lenta de omega-3, previene pérdidas antes de llegar al intestino.	(Vicente et al., 2017).

Tabla 4. Resumen de artículos de revistas para encapsulación de fitoesteroles

Objetivo (que encapsulan)	Método y tipo cobertura	Resultados	Referencia
Fortificar chocolate negro con 5, 10 y 15 % de fitoesteroles, variando la concentración de cacao.	Spray drying con aislado de proteína de suero.	Se obtuvo en las microcápsulas una capacidad de carga del 24.7%, baja actividad de agua y humedad. La capacidad antioxidante no se vio afectada debido a los compuestos fenólicos.	(Tolve et al, 2018).
Enriquecer queso cheddar con fitoesteroles y analizar su efecto en la disminución de colesterol.	Spray drying y coacervación compleja con maltodextrina y goma arábiga.	84.12% de rendimiento de encapsulación. Propiedades químicas no variaron, además de un aumento en el contenido de grasa. Características sensoriales sin diferencia significativa, a pesar de un incremento de amargor.	(Hussain et al., 2020).
Estudiar la viabilidad de la coencapsulación de aceite de pescado, fitoesteroles y limoneno para proteger al aceite de pescado de la oxidación y enmascarar su olor.	Spray drying utilizando como materiales de pared proteínas de la leche (aislado de proteína de suero y caseinato de sodio en una proporción de 4: 1).	La co-encapsulación permitió obtener un mejor olor y sabor e incrementó la retención de DHA y EPA en las microcápsulas.	(Chen et al., 2013).

Microencapsular aceite de soya enriquecido con fitoesteroles.	Spray Drying con mezclas entre proteína aislada de suero, inulina y quitosano como agentes cobertores.	85% de eficiencia de encapsulación. Niveles altos de cantidad de peróxido.	(Tolve et al., 2017)
Obtener un yogurt funcional con aceite de echium, fitoesteroles y ácido sinápico.	Coacervación compleja y crosslinking con gelatina y goma arábica y gelatina con goma de anacardo.	Características sensoriales no variaron. Buena eficiencia de encapsulación. Estabilidad de liberación en las condiciones gástricas simuladas.	(Comunian et al., 2017)
Producción de fitoesteroles encapsulados con diferentes soluciones acuosas y diferentes condiciones de operación.	Spray drying con aislado de proteína de suero, inulina, quitosano como material de recubrimiento y Tween 80 como agente tensoactivo.	El rendimiento del proceso varió de 13.8% a 43.8%. El tamaño de partícula fue inferior a 25 µm. El índice de peróxido fue bajo entre 0.39 y 0.58 meq O ₂ /kg de grasa.	(Tolve et al, 2019).
Estudiar la viabilidad de producción de micropartículas lipídicas que contienen fitoesteroles.	Freeze drying, con una mezcla de lípidos de grasas vegetales hidrogenadas bajas en trans (HVF) y ácido esteárico (SA) como material de pared.	Las microcápsulas con mayor punto de fusión son mejores en cuanto a rendimiento, manejo y aglomeración de partículas versus las de punto de fusión bajo.	(Alvim et al., 2013)

Métodos más utilizados

Spray drying o secado por aspersión.

Este método es uno de los más utilizados, debido a que permite obtener una buena calidad en los ingredientes alimentarios, dando una estabilidad en el proceso y es de bajo costo. Además, como se puede ver en las Tablas 3 y 4 este método es mencionado con mayor frecuencia. El secado por aspersión se basa en la atomización de un líquido o solución en suspensión que es transformado en pequeñas gotas, seguido de un secado por aire en altas temperaturas, lo que permite producir micropartículas sólidas (Di Battista, Contenla, Ramírez & Piña, 2015). Los materiales utilizados como recubrimiento en este método deben poseer ciertas características como ser emulsionantes, tener una alta solubilidad en agua, baja viscosidad y propiedades para el secado; pueden utilizarse maltodextrinas y proteínas lácteas como proteínas de suero y caseinato de sodio (Zhang et al, 2020). Este método comienza con la agitación y homogeneización de la solución encapsulante y el compuesto bioactivo para formar una emulsión o dispersión, después esta se calienta para que pueda ingresar al spray dryer y finalmente es secado con aire hasta temperaturas de aproximadamente 180 °C (Zhang et al, 2020; Joyce, Gustafsson & Prestidge, 2018; Tolve et al, 2019).

Algunos estudios presentan el efecto de la velocidad de agitación que puede afectar en la morfología de la partícula debido a que puede disminuir la estabilidad y eficiencia de la cápsula (Wang, Vongsvivut, Adhikari & Barrow, 2015; Tolve et al, 2019). De acuerdo con Tolve et al. (2019), otra característica que puede afectar el proceso es el pH y viscosidad de las soluciones acuosas, esto puede deberse a la utilización de diferentes tensioactivos que pueden variar la viscosidad de la solución, lo que puede afectar en la entrada al secador y generar grumos en la solución cuando este se encuentra en concentraciones muy altas.

Coacervación Compleja.

Otro de los procesos más utilizados en la micro y nano encapsulación de omega-3 y fitoesteroles es la coacervación compleja. Este proceso se basa en la unión de dos o más polímeros, generalmente proteínas y polisacáridos, con cargas opuestas que interactúan en medios acuosos y se unen para formar una pared alrededor del material a encapsular (Ghorbanzade et al., 2017). Es muy empleado por su bajo costo, alta escalabilidad, reproducibilidad y sencillez (Timilsena et al., 2019). Consiste en 3 fases:

- **Formación de la emulsión:** a una solución de biopolímeros se agrega el aceite a encapsular. La temperatura debe estar sobre del punto de gelatinización y el pH sobre el punto isoeléctrico de las proteínas. Se mezcla y homogeniza hasta alcanzar una emulsión estable.
- **Inducción o formación del coacervado:** se cambia el pH a un valor menor al punto isoeléctrico para obtener la separación de fases. La interacción entre la carga positiva de la proteína y la carga negativa del polisacárido permite la formación de gotas de la fase dispersa.
- **Endurecimiento:** para la formación de la pared se disminuye la temperatura a un valor menor al de gelación (Timilsena et al., 2019).

Además, después de la coacervación es usual hacer un proceso de entrecruzamiento o cross linking, que consiste en estabilizar e incrementar la resistencia de la pared del gel formado, mejorando sus propiedades termo mecánicas mediante la adición de sustancias químicas como ácido tánico o enzimas como la transglutaminasa, conocidos como cross-linkers (Timilsena et al., 2019).

El estudio de Ferreria & Regina (2020), de la Tabla 3, hace una comparación entre coacervación compleja y coacervación compleja por atomización de aceite de jengibre; este segundo consiste en agregar uno de los biopolímeros (en este caso la gelatina) en fragmentos pequeños (atomizados) a la goma arábica. Los resultados demostraron que ambos procesos

tienen una alta eficiencia de encapsulación, no obstante; el proceso con atomización demostró mayor rendimiento.

Comunian et al. (2017) obtuvieron buenos resultados aplicando coacervación compleja con gelatina y gomas (arábica y anacardo) y como cross-linker un compuesto fenólico. De igual manera, el enriquecimiento de queso cheddar con fitoesteroles fue positivo, se usó como agentes de cobertura a la goma arábica y maltodextrina (Hussain et al., 2020).

Freeze drying.

Entre las técnicas de microencapsulación, el enfriamiento por aspersión o freeze drying es una alternativa atractiva frente a otros métodos debido a sus tenues condiciones de procesamiento, buenos niveles de retención de componentes volátiles y posible producción a gran escala (Alvim et al., 2013). Además, se considera como uno de los métodos más prácticos y económicos, siendo de gran utilidad sobre todo para la encapsulación de componentes con baja solubilidad en agua y para aplicaciones alimentarias que son termodinámicamente desfavorables (Vicente et al., 2017).

La técnica de freeze drying se basa en la atomización de mezclas de lípidos en forma líquida que contienen la sustancia que se desea microencapsular en una cámara refrigerada. La atomización produce gotas finas que se tornan rígidas al entrar en contacto con aire frío en la cámara de atomización y forman las micropartículas de lípidos sólidos. Se pueden emplear rellenos hidrófilos o hidrófobos, en forma líquida o sólida. Como material de pared se puede utilizar grasas, ceras o sus mezclas con aceites para regular el punto de fusión y las propiedades de retención del material del núcleo (Alvim et al., 2013).

En la Tabla 4 se observa el estudio realizado por Alvim et al. (2013) donde se emplea freeze drying como método de microencapsulación. Mediante esta metodología se pudieron obtener micropartículas de lípidos sólidos con fitoesteroles en su núcleo, las cuales exhibieron

diámetros medios dentro del rango descrito en la literatura. Similarmente, en la Tabla 4 se observa otro estudio en el cual se realizan microcápsulas de aceite de sachá inchi mediante freeze drying. Esta metodología brindó una mayor resistencia térmica a los biopolímeros empleados para la formación de las microcápsulas, proporcionando protección al omega-3 del aceite de sachá inchi (Vicente et al., 2017).

Recopilación de resultados sensoriales, nutricionales y fisicoquímicos de los artículos seleccionados

El método químico de atrapamiento por liposomas permitió la fortificación de yogurt con aceite de pescado que contiene omega-3. Los resultados demostraron un incremento de la estabilidad de DHA y EPA, tras 21 días de almacenamiento, obteniendo 57% y 15% de retención, respectivamente. Mientras que las muestras de yogurt con aceite no encapsulado, tan solo retuvieron 27% y 6%. Además, se consiguió reducir la oxidación del aceite, el valor final de peróxido fue de 0.60 meq/kg; a comparación de 1.61 meq/kg del yogurt con aceite libre. En cuanto a los resultados sensoriales, la nano encapsulación permitió enmascarar el sabor y olor de aceite de pescado, por lo que las muestras de yogurt con aceite encapsulado presentaron características sensoriales estadísticamente iguales a la muestra control (Ghorbanzade et al., 2016).

De igual manera, un estudio sobre yogurt con encapsulación de aceite de echium, fitoesteroles y ácido sinápico obtuvo resultados favorables, alcanzando estabilidad oxidativa de los aceites encapsulados, resistencia a las condiciones gástricas e intestinales simuladas y propiedades sensoriales similares al yogurt control (Comunian et al., 2017). No obstante, el estudio realizado por Tolve et al. (2017) tuvo valores altos de contenido de peróxido u oxidación, contrario a los otros resultados mencionados previamente; sus valores en tiempo inicial fueron de 40.67-62.72 meq/kg. Los autores expresan como posible causa a la

temperatura muy elevada que pudo haber acelerado el proceso oxidativo. Así mismo, Tolve et al. (2019), presentan que la temperatura del proceso y las concentraciones del tensioactivo (Tween 80) llevan a un aumento significativo en el índice de peróxido durante el tiempo de almacenamiento.

Por otro lado, la encapsulación de aceite de salmón y el antioxidante astaxantina, mediante el proceso PGSS logró un rendimiento de encapsulación de 79.2%. Adicionalmente, el contenido de omega-3 en el aceite de pescado fue el mismo tras la encapsulación (49.7 mg/100 mg antes y 47.27mg/100 mg después) y se sabe que este proceso protege al aceite de daños oxidativos porque se realiza en ausencia de oxígeno (Haq & Chun, 2018).

El estudio sobre microencapsulación de fitoesteroles para enriquecimiento de queso cheddar obtuvo un rendimiento de encapsulación de 84.12%. No se observó cambio en la composición química en comparación a la muestra control de queso, a excepción de un aumento en las grasas. Además, hubo un incremento de dureza de 0.5N a 1.5N, la elasticidad disminuyó y la masticabilidad incrementó en muestras con más de 3% de fitoesteroles. También se observó que las ratas alimentadas con este queso enriquecido presentaron niveles menores de colesterol total, triglicéridos y LDL. Finalmente, no hubo diferencia significativa en los resultados sensoriales (Hussain et al., 2020).

Similarmente, el estudio de Nawas et al. (2017), en el que se desarrollaron helados funcionales fortificados con PUFA, también muestra que la adición de microcápsulas de aceite de carpa no influyó significativamente en los atributos fisicoquímicas del helado, excepto en el contenido de grasa y sólidos no grasos SNF ($p < 0.05$). Los helados fortificados presentaron un incremento en el contenido de grasa de 11,41% a 11,83%, lo cual indica una buena eficiencia de la microencapsulación y fortificación con PUFA. Simultáneamente, estos helados presentaban un valor de sólidos no grasos significativamente mayor en comparación con el

control, siendo este parámetro fundamental en helados ya que mejora el cuerpo y la textura mediante la capacidad de retención de agua y la emulsificación. El análisis sensorial reveló que los panelistas podían percibir la presencia del aceite de carpa únicamente en la muestra sabor a vainilla, siendo este el motivo de su bajo nivel de aceptación de 67,92%. No obstante, el helado fortificado sabor a chocolate presentó una aceptación de 82,17%, lo cual indica que es factible la fortificación de helados mediante microencapsulación, cuyo sabor permita enmascarar el uso de aceite de pescado.

En el estudio de Tolve et al. (2018), relacionado con la fortificación de chocolate negro con fitoesteroles, se determinó que entre menor es el tamaño de partículas encapsuladas, mayor aceptación sensorial tienen los chocolates, en este caso se obtuvo un tamaño de partícula inferior a 25 μm . A partir de este proceso, se logró obtener un porcentaje mayor de biodisponibilidad de los fitoesteroles en la fase gástrica y en el intestino delgado, esto se debe a la utilización de aislado de proteína de suero como recubrimiento ya que este va a ser digerido como proteína en el estómago y absorbido en el intestino. En la evaluación sensorial se encontró un efecto significativo ($p > 0.05$) en los atributos del chocolate esto se debe al contenido de cacao, no obstante, la interacción entre el contenido de cacao y concentración de fitoesteroles no presentó un efecto significativo. Para la prueba de consumidor se utilizó el chocolate con 85% de contenido de cacao debido a su mayor valor nutricional, este alcanzó todos los umbrales de aceptabilidad para las 4 muestras con fitoesteroles.

De igual manera, en un estudio se enriquecieron nuggets de pollo mediante microencapsulación de omega-3 de aceite de pescado. Estos nuggets tuvieron buena aceptabilidad y no presentaron olores ni características no deseadas. Se mostraron cambios en la oxidación de los PUFA a mayor concentración durante el almacenamiento, esto se debe a que si es muy alta la concentración tendrá un efecto prooxidante. Se redujeron los cambios en

los compuestos volátiles durante el almacenamiento, permitiendo que la microencapsulación sirva como protección contra la oxidación del aceite de pescado en productos cárnicos (Jiménez, Pérez, Ruiz & Antequera, 2015).

Asimismo, en una investigación se estudió el efecto protector de la microencapsulación de aceite de *sacha inchi* (SIO) al estar expuesto a condiciones gástricas, así como su estabilidad química y la efectividad de liberación de omega-3. Se demostró que las microcápsulas SIO-Ovoalbúmina-Pectina y SIO-Ovoalbúmina-Goma Xantana protegen eficazmente el omega-3. Adicionalmente, las microcápsulas presentaron una liberación de omega-3 muy lenta, lo cual es beneficioso dado que previene la pérdida de omega-3 antes de llegar al intestino (Vicente et al., 2017).

El estudio de Lei et al. (2018) propone la microencapsulación como una técnica que brinda mayor estabilidad al aceite de oliva. En este estudio se evaluó el cambio del índice de peróxido POV del aceite de oliva microencapsulado con un material de pared de almidón poroso de camote morado y no encapsulado a 60°C, luego de 4 días de prueba el POV del aceite microencapsulado se encontraba dentro de los parámetros para este aceite ($POV \leq 10$ mmol / kg), mientras que el del aceite de oliva sin encapsular aumentó significativamente. Este resultado indica que la microencapsulación permite incrementar la estabilidad del aceite de oliva ante reacciones de oxidación. Igualmente, en otro estudio se empleó almidón de taro como material de cobertura de las microcápsulas de aceite de almendra, donde se obtuvo una eficiencia de encapsulación efectiva de $37,5 \pm 0,5\%$. Este bajo nivel de eficiencia se debe a la estructura porosa de las microcápsulas que permitió el flujo de disolventes y una extracción relativamente rápida del aceite. Sin embargo, los agregados esféricos de almidón de taro proporcionaron protección contra las reacciones de oxidación (Hoyos-Leyva et al., 2019).

De igual manera, en un estudio sobre microencapsulación de aceite de atún, se evaluó la adición de compuestos lipofílicos como la vitamina A, E, D y K, el cual mostró una aceleración significativa en la oxidación del aceite ($p < 0.05$). Esto se debe a que las propiedades antioxidantes en concentraciones elevadas tienden a dar efectos prooxidantes en el aceite. No obstante, la adición de palmito ascorbilo a la formulación del aceite fortificado permitió que se reduzca la oxidación después de la microencapsulación (Wang, Vongsivut, Adhikari & Barrow, 2015).

Otros autores evaluaron el efecto de la co-encapsulación de tres componentes bioactivos lipofílicos (LBC) en microcápsulas, que contenían el aceite de pescado, los fitoesteroles y el limoneno, y se compararon con la microcápsula que sólo contenía aceite de pescado. Los resultados muestran que no se obtuvo una diferencia significativa ($p > 0.05$) en la eficiencia de la microencapsulación y los indicadores de oxidación (PV y AV) luego del almacenamiento acelerado para los dos tipos de microcápsulas. Por otro lado, se observó que la retención de EPA y DHA en las microcápsulas de LBC fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que en las microcápsulas de aceite de pescado. En cuanto al contenido de fitoesteroles este se mantuvo igual, pero se dio una pérdida de limoneno luego del almacenamiento. Además, la co-encapsulación permitió que las microcápsulas de LBC tengan un mejor sabor y olor que las microcápsulas de aceite de pescado después de pasar por secado y almacenamiento (Chen et al., 2013).

Finalmente, Alvim et al. (2013), estudiaron la viabilidad de microencapsular una mezcla de fitoesteroles compuesta por: brassicasterol, estigmasterol, campesterol y sitosterol. Sus resultados indican que las microcápsulas de lípidos con un punto de fusión más alto, es decir, aquellas con más ácido esteárico y menos fitoesteroles, son una alternativa prometedora como sistema de liberación de sustancias hidrófobas, como el fitoesterol, en comparación con las microcápsulas de lípidos con puntos de fusión más bajos. Desde un punto de vista práctico

y tecnológico, las microcápsulas con menor punto de fusión son las que permiten tener un mayor rendimiento y son más fáciles de manejar.

CONCLUSIONES

Los métodos de micro o nano encapsulación son una solución eficiente para la ciencia e industria alimentaria. Esta técnica de encapsulación permite la incorporación de lípidos esenciales para el ser humano y su correcto desarrollo, como son el omega-3 y los fitoesteroles. La formación de cápsulas que contienen estos componentes permite dar un valor nutricional agregado a una amplia variedad de alimentos, como lácteos, cárnicos, chocolates, entre otros; conservando las propiedades organolépticas y sensoriales de los productos. Además, en la tecnología de alimentos contribuye a la estabilidad de estos aceites, protegiéndolos de procesos de oxidación. Existen muchos estudios al respecto, en donde se resalta la importancia de considerar todos los aspectos influyentes, como agentes de encapsulación y métodos de encapsulación para conseguir mejores resultados.

REFERENCIAS

- Alvim, I. D., Souza, F. D. S. D., Koury, I. P., Jurt, T., & Dantas, F. B. H. (2013). Use of the spray chilling method to deliver hydrophobic components: physical characterization of microparticles. *Food Science and Technology*, 33, 34–39. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612013000500006>
- Arias, D., Montaña, L., Velasco, M. & Martínez, J. (2018). Alimentos funcionales: avances de aplicación en agroindustria. *Revista Tecnura*, 22(57), 55-68. doi:10.14483/22487638.12178
- Ayoub, A., Sood, M., Singh, J., Bandral, J., Gupta, N. & Bhat, A. (2019). Microencapsulation and its applications in the food industry. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8 (3),. 32-37.
- Chen, Q., McGillivray, D., Wen, J., Zhong, F., & Quek, S. Y. (2013). Co-encapsulation of fish oil with phytosterol esters and limonene by milk proteins. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 505-512. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.01.011
- Comunian, T. A., Chaves, I. E., Thomazini, M., Moraes, I. C. F., Ferro-Furtado, R., de Castro, I. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2017). Development of functional yogurt containing free and encapsulated echium oil, phytosterol and sinapic acid. *Food Chemistry*, 237, 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.071>
- Comunian, T.A. & Favaro-Trindade, C. (2016). Microencapsulation using biopolymers as an alternative to produce food enhanced with phytosterols and omega-3 fatty acids: A review. *Food Hydrocolloids*, 61, 442-457.
- Di Battista, C., Contenla, D., Ramírez, M., & Piña, J. (2015). The use of arabic gum, maltodextrin and surfactants in the microencapsulation of phytosterols by spray drying. *Powder Technology*, 286, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.016>
- Ferreira, S., & Nicoletti, V. R. (2020). Microencapsulation of ginger oil by complex coacervation using atomization: Effects of polymer ratio and wall material concentration. *Journal of Food Engineering*, 291, 110214. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110214>

- Geranpour, M., Assadpour, E. & Mahdi, S. (2020). Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils. *Trends in Food Science & Technology*, *102*, 71-90.
- Gies, M., Servent, A., Borel, P., & Dhuique-Mayer, C. (2020). Phytosterol vehicles used in a functional product modify carotenoid/cholesterol bioaccessibility and uptake by Caco-2 cells. *Journal of Functional Foods*, *68*, 103920. doi: 10.1016/j.jff.2020.103920
- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food Chemistry*, *216*, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Gisterå, A. & Hansson, G. (2017). The immunology of atherosclerosis. *Nat Rev Nephrol* *13*, 368–380. <https://doi.org/10.1038/nrneph.2017.51>
- Haq, M., & Chun, B. S. (2018). Microencapsulation of omega-3 polyunsaturated fatty acids and astaxanthin-rich salmon oil using particles from gas saturated solutions (PGSS) process. *Lwt*, *92*(March), 523–530. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.009>
- Hussain, M., Li, X., Liu, L., Wang, L., Qayum, A., Purevsuren, B., & Hussain, A. (2020). Characterization and anti-hyper-lipidemic effect of micro encapsulated phytosterol enriched cheddar cheese. *LWT*, *134*, 110114. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110114>
- Hoyos-Leyva, J., Bello-Perez, L., Agama-Acevedo, J., Alvarez-Ramirez, J., & Jaramillo-Echeverry, L. (2019). Characterization of spray drying microencapsulation of almond oil into taro starch spherical aggregates. *Lwt*, *101*, 526-533. doi:10.1016/j.lwt.2018.11.079
- Jimenez, E., Pérez, T., Ruiz, J., & Antequera, T. (2015). Enrichment of Chicken Nuggets with Microencapsulated Omega-3 Fish Oil: Effect of Frozen Storage Time on Oxidative Stability and Sensory Quality. *Food and Bioprocess Technology*, *9*. 285-297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-015-1621-x>
- Joyce, P., Gustafsson, H. & Prestidge, C. (2018). Enhancing the lipase-mediated bioaccessibility of omega-3 fatty acids by microencapsulation of fish oil droplets within porous silica particles. *Journal of Functional Foods*, *47* (August), 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.06.015>

- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. & Adhikari, B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868-881.
- Kepczynski, M., & Róg, T. (2016). Functionalized lipids and surfactants for specific applications. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1858(10), 2362–2379. doi:10.1016/j.bbamem.2016.02.038
- Lei, M., Jiang, F. C., Cai, J., Hu, S., Zhou, R., Liu, G., Wang, Y. H., Wang, H. B., He, J. R., & Xiong, X. G. (2018). Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.051>
- Morris A. & Mohiuddin S. (2020). Biochemistry, Nutrients. StatPearls Publishing; Obtenido el 29 de septiembre de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554545/>
- Nawas, T., Yousuf, N., Azam, S., Ramadhan, A., Xu, Y. & Xia, W. (2017). Physiochemical Properties and Sensory Attributes of Ice Cream Fortified with Microencapsulated Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Oil. *American Journal of Food Science and Nutrition Research*. 4, (3) 2017, 79-86.
- Organización Mundial de la Salud. (2020). ¿Qué son las enfermedades cardiovasculares?. OMS. Obtenido el 28 de septiembre del 2020 de https://www.who.int/cardiovascular_diseases/about_cvd/es/
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Their Health Benefits. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 345–381. doi:10.1146/annurev-food-111317-095850
- Timilsena, Y. P., Akanbi, T. O., Khalid, N., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2019). Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 1276–1286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.144>
- Tolve, R., Condelli, N., Can, A., & Tchuenbou-Magaia, F. L. (2017). Development and Characterization of Phytosterol-Enriched Oil Microcapsules for Foodstuff Application. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 152–163. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1990-4>

- Tolve, R. et al. (2018). Microencapsulation of phytosterols for food functionalization (Preparation and characterization of microencapsulated phytosterols for the formulation of functional foods: Scale up from laboratory to semi-technical production). *Food Research International*.
- Tolve, R. et al. (2018). Fortification of dark chocolate with microencapsulated phytosterols: chemical and sensory evaluation. *Food and Function*, 2. <https://doi.org/10.1039/C7FO01822C>
- Tolve, R. et al. (2019). Preparation and characterization of microencapsulated phytosterols for the formulation of functional foods: Scale up from laboratory to semi-technical production. *Food Research International*, 116, 1274-1281. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.016>
- Vicente, J., Cezarino, T. D. S., Pereira, L. J. B., Rocha, E. P. D., Sá, G. R., Gamallo, O. D., & Garcia-Rojas, E. E. (2017). Microencapsulation of sachu inchi oil using emulsion-based delivery systems. *Food Research International*, 99, 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.039>
- Wang, B., Vongsvicut, J., Adhikari, B. & Barrow, C. (2015). Microencapsulation of tuna oil fortified with the multiple lipophilic ingredients vitamins A, D3, E, K2, curcumin and coenzyme Q10. *Journal of Functional Food*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.027>
- Zhang, Y. et al. (2020). Buttermilk as a wall material for microencapsulation of omega-3 oils by spray drying. *LWT*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109320>