UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos en emulsiones alimentarias

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

González Díaz Mercedes Esmeralda

Director de tesis: **Dr. Jaime David Pérez Martínez**

Co-director: **Dr. Alejandro Rocha Uribe**

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. NOVIEMBRE 2026

UASLP-Sistema de Bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos en emulsiones alimentarias © 2026 por González Díaz Mercedes Esmeralda se distribuye bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivadas 4.0 Internacional ..

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Biopolímeros Alimentarios de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en el periodo comprendido de agosto 2023 y agosto 2026, bajo la dirección del Dr. Jaime David Pérez Martínez y la co-dirección del Dr. Alejandro Rocha Uribe.

El programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), registro 000588. Número de la beca otorgada por SECIHTI corresponde al número de CVU. 412308.

Los datos del trabajo titulado “Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos en emulsiones alimentarias” se encuentran bajo el resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M13

Aprobación de Tema de Tesis

San Luis Potosí SLP a noviembre / 20 / 2023

Dr. Jaime David Pérez Martínez
Director de Tesis

Habiendo revisado su solicitud para el registro de título de tesis de la alumna **Mercedes Esmerada González Díaz** Estudiante de Maestría en Ciencias en Bioprocesos.

Esta Coordinación a mi cargo, le informa que el Comité Académico del Posgrado (CAP), avaló y consideró **APROBADO** el registro de Título de tesis:

Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos en emulsiones alimentarias.

Sin más por el momento, quedo de Uds.

Dr. Alejandro Rocha Uribe

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos en emulsiones alimentarias

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

González Díaz Mercedes Esmeralda

SINODALES:

PRESIDENTE: Dra. Claudia Inés Victoria Campos _____

SECRETARIO: Dr. Alejandro Rocha Uribe _____

VOCAL: Dr. Jaime David Pérez Martínez _____

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. NOVIEMBRE 2026

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dr. Jaime David Pérez Martínez: Director de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos, Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Alejandro Rocha Uribe: Codirector de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos, Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dra. Claudia Inés Victoria Campos: Tutor de tesis. Adscrita al Posgrado en Salud Pública, Facultad de Nutrición de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí S.L.P. a octubre 02 del 2026

En la ciudad de San Luis Potosí el día 02 del mes de octubre del año 2026, la que suscribe Mercedes Esmeralda González Díaz, alumna del programa de posgrado en Ciencias en Bioprocesos, adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dr. Jaime David Pérez Martínez y Co-dirección del Dr. Alejandro Rocha Uribe cede los derechos del trabajo titulado “Desarrollo y caracterización de interfaces multicapa para encapsulamiento de compuestos bioactivos” en emulsiones alimentarias a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo sin el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con los autores escribiendo a la siguiente dirección jdavidperez@uaslp.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

_____

Mercedes Esmeralda González Díaz

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a 14/10/2026

LB. María Zita Acosta Nava
Biblioteca de Posgrado
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada "DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE INTERFACES MULTICAPA PARA ENCAPSULAMIENTO DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN EMULSIONES ALIMENTARIAS", presentada por la autora Mercedes Esmeralda González Díaz. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias en Bioprocesos. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 9% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Dra. Alicia Grajales Lagunes
Coordinador Académico del Posgrado
en Ciencias en Bioprocesos

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización y culminación de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a mi familia, por su amor, apoyo incondicional y motivación constante. Gracias por acompañarme durante este proceso, por comprender mis ausencias, mis momentos de cansancio y por impulsarme a seguir adelante cuando el camino parecía complicado. Sin duda, este logro lleva una parte de cada uno de ustedes.

A mis amigos y compañeros, gracias por su cariño, sus palabras de aliento y por hacer de esta etapa una experiencia mucho más enriquecedora. Su compañía y apoyo fueron importantes para mantenerme motivada y recordar que los grandes objetivos también se construyen con pequeños momentos compartidos.

En el ámbito profesional, quiero expresar mi especial agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Jaime David Pérez Martínez, por su orientación, confianza y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por compartir sus conocimientos y por brindarme la oportunidad de crecer tanto académica como profesionalmente.

Al Dr. Alejandro Rocha Uribe, agradezco profundamente sus aportaciones, consejos y disposición para compartir su experiencia y conocimientos, los cuales enriquecieron de manera importante este trabajo.

De manera muy especial, agradezco a mi asesora y tutora, la Dra. Claudia Inés Victoria Campos, por su paciencia y acompañamiento durante todo este proceso. Gracias por compartir conmigo no solamente sus conocimientos, sino también la pasión y el entusiasmo con los que desarrolla sus líneas de investigación. Su manera de trabajar y de transmitir el gusto por la ciencia fue una inspiración para mí y contribuyó a que encontrara en la investigación un campo que disfruto y valoro profundamente.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por haber formado parte de este camino y por contribuir, de una u otra manera, a que hoy pueda cerrar esta etapa con satisfacción, aprendizaje y gratitud

RESUMEN

Los ácidos grasos poliinsaturados omega-3 presentan importantes beneficios para la salud; sin embargo, su elevada susceptibilidad a la oxidación limita su incorporación en matrices alimentarias. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y caracterizar emulsiones aceite en agua (O/W) multicapa mediante la técnica de deposición electrostática capa por capa (LbL), utilizando proteínas vegetales y polisacáridos para mejorar la estabilidad oxidativa de aceite de pescado rico en AGPI omega-3. Inicialmente se valoró en potencial Z de todos los biopolimeros en un rango de pH (2-7), encontrando que el pH de 3 fue determinante para favorecer las interacciones electrostáticas entre ellos y la formación de estructuras multicapa estables. En estas condiciones de pH las emulsiones primarias se formularon empleando concentrados de proteína de arroz o soya como agentes emulsificantes, seguidos de la deposición secuencial de goma xantana y quitosano para formar emulsiones secundarias y terciarias. Los sistemas fueron caracterizados mediante potencial Z, tamaño de partícula y estabilidad oxidativa. Durante los estudios de oxidación acelerada, el aceite de pescado sin encapsular alcanzó valores de productos primarios y secundarios de oxidación mayores ($p < 0.05$) en comparación con el aceite encapsulado, lo cual indica una menor generación de productos secundarios y primarios de oxidación. La incorporación de goma xantana y quitosano generó una barrera interfacial que disminuyó la oxidación lipídica en los aceites ricos en AGPI omega-3 en medios ácidos.

Palabras clave: emulsiones multicapa, capa por capa, omega-3, estabilidad oxidativa.

ABSTRACT

Omega-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) provide important health benefits; however, their high susceptibility to oxidation limits their incorporation into food matrices. The objective of this study was to develop and characterize multilayer oil-in-water (O/W) emulsions using the layer-by-layer (LbL) electrostatic deposition technique, employing plant proteins and polysaccharides to improve the oxidative stability of fish oil rich in omega-3 PUFAs. Initially, the zeta potential of all biopolymers was evaluated over a pH range of 2–7, showing that pH 3 was critical for promoting electrostatic interactions among the biopolymers and the formation of stable multilayer structures. Under these pH conditions, primary emulsions were formulated using rice or soy protein concentrates as emulsifying agents, followed by the sequential deposition of xanthan gum and chitosan to form secondary and tertiary emulsions. The systems were characterized in terms of zeta potential, particle size and oxidative stability. During accelerated oxidation studies, unencapsulated fish oil exhibited significantly higher levels of primary and secondary oxidation products ($p < 0.05$) compared with encapsulated fish oil, indicating lower formation of primary and secondary oxidation products in the multilayer emulsions. The incorporation of xanthan gum and chitosan generated an interfacial barrier that reduced lipid oxidation in omega-3 PUFA-rich oils under acidic conditions.

Keywords: multilayer emulsions, Layer-by-Layer, rice protein, omega-3 fatty acids, oxidative stability

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS viii

RESUMEN ix

ABSTRACT x

1. INTRODUCCIÓN 1
2. ANTECEDENTES 4
   - 2.1 Alimentos funcionales, nutracéuticos y compuestos bioactivos 4
   - 2.2 Lípidos bioactivos 4
   - 2.3 Ácidos grasos omega-3 y omega-6 6
   - 2.4 Impacto en la salud de omega-3 y omega-6 7
   - 2.5 Limitaciones en la fortificación de alimentos con omega-3 9
   - 2.6 Microencapsulación de AGPI omega-3 11
   - 2.7 Emulsiones 15
   - 2.7.1 Formación de las emulsiones 16
   - 2.7.2 Procesos de desestabilización de emulsiones 16
   - 2.7.3 Estrategias para la estabilización cinética de las emulsiones 18
   - 2.8 Emulsiones multicapa 19
3. JUSTIFICACIÓN 26
4. HIPÓTESIS 28
5. OBJETIVOS 29
   - 5.1 Objetivo general 29
   - 5.2 Objetivos específicos 29
6. MATERIALES Y MÉTODOS 30
   - 6.1 Materiales 30
   - 6.2 Caracterización de los hidrocoloides 30
   - 6.2.1 Medición de potencial Z 30
   - 6.2.2 Solubilidad de las proteínas 30

6.3 Preparación de las emulsiones multicapa 31
6.4 Caracterización fisicoquímica de las emulsiones 31
6.4.1 Tamaño de gota y potencial Z 32
6.4.2 Determinación de productos de oxidación en emulsiones 32
6.4.3 Extracción de la fase oleosa de las emulsiones 32
6.4.4 Índice de peróxidos 33
6.4.5 Valor de p-anisidina 33
6.5 Análisis estadístico 34
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 35
7.1 Caracterización de los hidrocoloides 35
7.2 Caracterización de las propiedades electrostáticas y de solubilidad de proteínas 39
7.3 Formación de emulsiones 41
7.4 Evaluación de la estabilidad de las emulsiones 43
7.4.1 Evaluación de emulsiones primarias, secundarias y terciarias 43
7.4.1.1 Tamaño de gota 43
7.4.1.2 Potencial Zeta 44
7.4.1.3 Evaluación de la estabilidad oxidativa de los AGPI omega-3 46
8. CONCLUSIONES 50
9. BIBLIOGRAFÍA 53
10. ANÁLISIS DE SIMILITUD ……..

1. INTRODUCCIÓN

Un compuesto bioactivo se define como “un compuesto esencial o no esencial que se encuentra en la naturaleza, es parte de la cadena alimentaria y tiene un efecto positivo en la salud humana” (Hans-Konrad et al., 2009). Dentro de esta clasificación se encuentran los lípidos bioactivos, donde la evidencia científica señala que una parte importante de sus efectos benéficos se relaciona con los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) omega-3 y omega-6. Las principales fuentes de obtención de AGPI omega-6 son los aceites vegetales y semillas, mientras que los AGPI omega-3 se encuentran principalmente en productos de origen marino, particularmente en pescados con elevado contenido de grasa y algunas especies de algas (Valenzuela et al., 2011).

Idealmente, la relación entre ácidos grasos omega-6: omega-3 no debería exceder una proporción de 4:1, debido a que un adecuado balance entre ambos tipos de ácidos grasos favorece la regulación de procesos inflamatorios y se ha asociado con efectos protectores frente a enfermedades cardiovasculares, algunos tipos de cáncer y enfermedades inflamatorias como la artritis reumatoide (Baghagan et al., 2019). Sin embargo, la proporción observada actualmente en las dietas occidentales presenta valores considerablemente mayores, aproximadamente entre 15:1 y 16.7:1, favoreciendo un estado metabólico con mayor tendencia proinflamatoria (Simopoulos, 2002). Por esta razón, existe un creciente interés en incrementar el consumo de AGPI omega-3 mediante alimentos enriquecidos y sistemas que permitan su incorporación eficiente en matrices alimentarias. La importancia de incrementar la disponibilidad de alimentos que aporten AGPI omega-3 es tal que, diversos organismos internacionales han establecido recomendaciones de consumo asociadas con efectos benéficos para la salud. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan una ingesta aproximada de 250–500 mg/día de EPA+DHA para adultos, con la finalidad de contribuir al mantenimiento de la salud cardiovascular, mientras que para el ácido α-linolénico (ALA) se

recomienda un consumo aproximado de 0.5–0.6% de la energía diaria total (FAO, 2010). Durante etapas específicas de la vida, como el embarazo y la lactancia, los requerimientos de omega-3 aumentan debido al papel fundamental del DHA en el desarrollo cerebral y visual del feto y del lactante, recomendándose una ingesta adicional de 100–200 mg/día de DHA, además del consumo general de EPA+DHA (EFSA, 2010). En población infantil, especialmente durante los primeros años de vida, el DHA representa un nutriente relevante para el desarrollo neurológico y visual, por lo que asegurar un aporte adecuado resulta fundamental (Koletzko et al., 2011). Desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo de alimentos funcionales enriquecidos con omega-3 requiere garantizar que estos compuestos bioactivos permanezcan estables y presentes en cantidades suficientes para generar un beneficio fisiológico. De acuerdo con la regulación europea, un alimento puede utilizar la declaración “fuente de ácidos grasos omega-3” cuando contiene al menos 40 mg de EPA+DHA por 100 g de alimento o por 100 kcal, mientras que la declaración “alto contenido de omega-3” requiere un aporte mínimo de 80 mg de EPA+DHA por 100 g o por 100 kcal (Reglamento (CE) No. 1924/2006). Aunque en México la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010 que regula el etiquetado de los alimentos, solo establece que cuando los alimentos se etiqueten como “fuente de omega-3” deben especificar la cantidad de ácidos grasos saturados, mono- o poli-insaturados por cada 100 g o 100 ml del alimento. Estos criterios resaltan la importancia de desarrollar estrategias tecnológicas que permitan incorporar cantidades nutricionalmente relevantes de omega-3, conservando su calidad durante el procesamiento y almacenamiento. Sin embargo, la incorporación de AGPI omega-3 en matrices alimentarias presenta diversos desafíos, como la dificultad para dispersarlos en sistemas acuosos, su elevada susceptibilidad a la oxidación, su inestabilidad frente a temperaturas elevadas y la generación de sabores y olores desagradables derivados de su deterioro oxidativo. Ante estas dificultades, la industria alimentaria busca formulaciones viables que permitan incluir aceites marinos ricos en omega-3 en diferentes productos alimenticios, manteniendo sus propiedades nutricionales y sensoriales (Valenzuela & Sanhueza, 2009).

Una de las estrategias que puede mejorar la estabilidad química de los AGPI omega-3 es su encapsulación mediante sistemas comestibles, como las emulsiones. Entre los materiales empleados para este propósito se encuentran biopolímeros como polisacáridos y proteínas de origen vegetal, los cuales son capaces de estabilizar cinéticamente las emulsiones y contribuir a sus propiedades estructurales e interfaciales (Bouyer et al., 2012). En la actualidad, el uso de proteínas vegetales como emulsificantes ha adquirido gran interés debido a la tendencia hacia prácticas alimentarias más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Además, algunas proteínas vegetales presentan ventajas tecnológicas y nutricionales, al representar alternativas a las proteínas de origen animal para diversas aplicaciones alimentarias (Burgos-Díaz et al., 2016)

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Alimentos funcionales, nutracéuticos y compuestos bioactivos

Los términos alimento funcional, nutracéutico y compuesto bioactivo están estrechamente relacionados y, en casos particulares, un material puede ser asignado a más de una de estas categorías. Por tanto, a continuación, se particularizan sus similitudes y diferencias. Los alimentos funcionales son alimentos que, además de aportar nutrientes, ofrecen beneficios para la salud y la prevención de enfermedades. Estos alimentos contienen ingredientes que al consumirlos regularmente mejoran algunas funciones biológicas, debido a su actividad como: antioxidantes, antiinflamatorios, anticolesterolémicos y mejoradores de sensibilidad a la insulina, lo que contribuye a prevenir enfermedades (Alkhatib et al., 2017). Los nutracéuticos son alimentos o parte de los alimentos que brindan beneficios para la salud, incluyendo la prevención y tratamiento de enfermedades. Estos incluyen, nutrientes aislados, suplementos alimentarios y dietas específicas, productos herbales y alimentos procesados (AlAli et al., 2021; DeFelice, 1995). Se considera componente bioactivo de un alimento, a aquel que aporta un beneficio a la salud más allá de los considerados como nutrición básica. Estos componentes se encuentran, en general, en pequeñas cantidades en algunos productos de origen vegetal y animal (Segura Campos, 2014). Actualmente existe una industria creciente en la generación de alimentos enriquecidos con estos compuestos, en el mercado mundial esta industria representó 289,8 mil millones de dólares en 2021, con previsión de 439 mil millones de dólares para 2026 (Tsiaka et al., 2022). Los compuestos bioactivos más representativos para la dieta humana son: carotenoides, compuestos fenólicos, glucosinolatos, vitaminas, tocoferoles, fitoesteroles, compuestos organosulfurados, flavonoides, ácidos grasos, fibra dietética y folatos, entre otros.

2.2 Lípidos bioactivos

Los lípidos bioactivos son moléculas lipídicas que más allá de sus funciones estructurales o energéticas, desempeñan funciones específicas en la mejora de la

salud. Proporcionan estos beneficios principalmente mediante cambios en la composición de ácidos grasos de diferentes tejidos y la promoción de vías de señalización celular (Escribá et al., 2008). Una clasificación para estos compuestos es la siguiente:

1. Ácidos grasos poliinsaturados. Los AGPI omega-6 y omega-3 son los lípidos bioactivos más importantes al ser precursores en la biosíntesis de hormonas celulares (eicosanoides) y varios compuestos de señalización con papeles relevantes en la salud humana (Aluko, 2012). Actúan regulando procesos inflamatorios y vasculares (Cronstein & Weiss, 2018), en específico el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), promueven la homeostasis (Poblete et al., 2020).
2. Ácidos grasos de cadena media (AGCM). Se caracterizan por su rápida absorción y oxidación en el hígado (St-Onge & Jones, 2002). Influyen en la regulación del metabolismo energético, el control de la saciedad y la homeostasis lipídica (Marten et al., 2006).
3. Esfingolípidos y lisofosfolípidos. El grupo incluye moléculas como esfingomielina, las ceramidas, esfingosina-1-fosfato (S1P) y lisofosfatidilcolina (LPC), que regulan crecimiento celular, señalización inmune y apoptosis (McCubrey et al., 2022). Por ejemplo, las ceramidas y la S1P, están implicadas en inflamación crónica, resistencia insulínica y disfunción vascular (Leyrolle et al., 2020).
4. Endocannabinoides. Son derivados de ácidos grasos poliinsaturados, principalmente del ácido araquidónico, que actúan como ligandos endógenos de los receptores cannabinoides CB1 y CB2 del sistema endocannabinoide. Entre las que destacan la anandamida y el 2-araquidonoilglicerol (2-AG), los cuales cumplen funciones clave en la regulación de procesos fisiológicos como la modulación del dolor, el apetito, la memoria, el estado de ánimo, la inflamación y la homeostasis energética (Di Marzo, 2018; Lu & Mackie, 2021).
5. Oxilipinas. Moléculas lipídicas oxigenadas, derivadas de ácidos grasos poliinsaturados omega-6 y omega-3. Que regulan procesos fisiológicos como inflamación, señalización celular, metabolismo energético y homeostasis,

con efectos que pueden ser tanto proinflamatorios (por ejemplo, como los derivados del ácido araquidónico), como antiinflamatorios como los derivados de los AGPI omega-3 (Misheva et al., 2022).

6. Carotenoides. Estos compuestos se caracterizan por la presencia de dobles enlaces conjugados, lo que les confiere propiedades antioxidantes al neutralizar especies reactivas de oxígeno. Además, tienen un efecto positivo frente al estrés oxidativo, al mantenimiento de la salud ocular y a la modulación de la respuesta inmune (Maoka, 2020; Fiedor & Burda, 2014).
7. Fitoesteroles. Compuestos de origen vegetal estructuralmente similares al colesterol y son reconocidos por su capacidad de reducir los niveles de colesterol plasmático al competir con su absorción intestinal. Además de su efecto hipocolesterolémico, también se les atribuyen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes e inmunomoduladoras (Ritchey et al., 2022; Salehi et al., 2021).

2.3 Ácidos grasos omega-3 y omega-6

Químicamente los AGPI omega-6 y omega-3 son ácidos grasos poliinsaturados caracterizados por la posición del primer doble enlace en su cadena hidrocarbonada, contado desde el carbono metilo terminal o también denominado carbono omega. En los AGPI omega-3, el primer doble enlace se localiza en el tercer átomo de carbono a partir del extremo metilo, mientras que en los AGPI omega-6, este se encuentra en el sexto carbono desde dicho extremo (Burdge & Calder, 2015; Simopoulos, 2016).

Los AGPI omega-3 más relevantes para la salud humana son ácido α-linolénico (C18:3, ALA), ácido eicosapentaenoico (C20:5, EPA) y el ácido docosahexaenoico (C22:6, DHA). Mientras que los AGPI omega-6 con impacto positivo a la salud son el ácido linoleico (C18:2, LA) y el ácido araquidónico (C20:4, AA) (Valenzuela et al., 2011) (Fig.1).

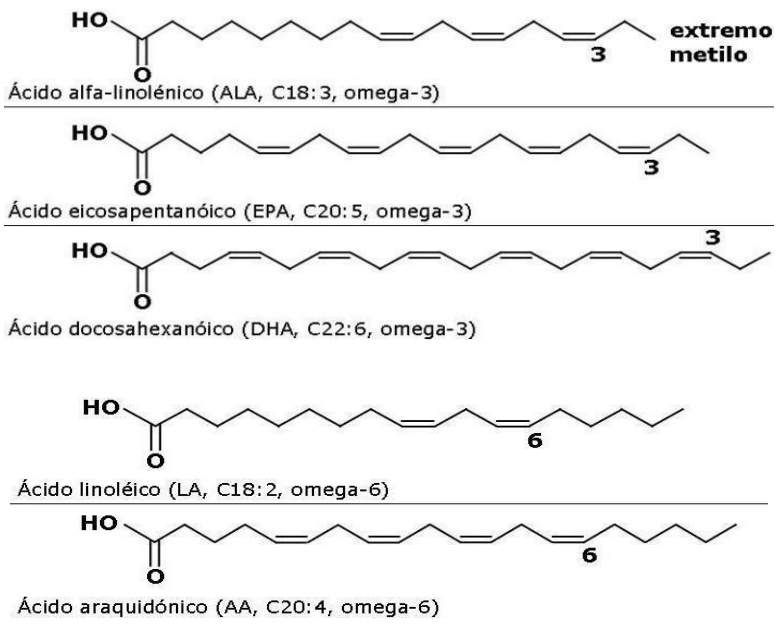


Figura 1. Estructura química de los ácidos grasos omega-3 y omega-6 más comunes en la naturaleza.

Las principales fuentes de ALA son algunas semillas y frutos secos como la chía, linaza, nuez, canola y verduras de hoja verde. El EPA y el DHA se encuentran principalmente en alimentos como leche materna y peces marinos grasos. También pueden ser suplementados con aceites de pescado (salmón, caballa, sardinas, anchoas, arenque y trucha arcoíris), microalgas, calamar y krill (Saini & Keum, 2018). Los omega-6 se encuentran de forma abundante en aceites vegetales como el aceite de maíz, girasol, soya, cártamo y canola, así como en frutos secos y semillas (Simopoulos, 2016). También están presentes en productos derivados de estos aceites, como margarinas y alimentos procesados (Calder, 2015).

2.4 Impacto en la salud de omega-3 y omega-6

Los ácidos grasos omega-3 y omega-6 son ácidos grasos esenciales (AGE) para el ser humano debido a que carecemos de la maquinaria enzimática necesaria para biosintetizarlos (Valenzuela et al., 2011)**.** La suplementación de la dieta con AGPI

omega-3 y dietas ricas alimentos que los contienen generan efectos positivos en la salud humana en torno a la inflamación, salud cardiovascular y la función cerebral. La suplementación con EPA y DHA reduce los marcadores de inflamación como la proteína C reactiva (CRP), el factor de necrosis tumoral alfa (TNF-α) y la interleucina-6 (IL-6) (Delgado-Barroso et al., 2022). Los ácidos grasos AGPI omega-3 fungen como cardioprotectores al reducir el riesgo de muerte cardiovascular, eventos como infarto de miocardio no fatal, la aterosclerosis y enfermedad coronaria (Bernstein et al., 2021). Existe una asociación entre el consumo de AGPI omega-3 y una menor incidencia de trastornos depresivos. Particularmente, suplementos con altas proporciones de EPA mejoran significativamente los síntomas de depresión cuando se usan como complemento al tratamiento farmacológico (Mocking et al., 2016). Además, los AGPI omega-3 son capaces de prevenir la acumulación neuronal de calcio, bloqueando una cascada de eventos celulares los cuales inducen la apoptosis neuronal, también tienen la capacidad de reducir el daño ocasionado por el estrés oxidativo en las neuronas a través de las neuroprotectinas, docosanoides derivados del DHA (Lukiw et al., 2005). Los AGPI omega-3 impactan favorablemente la composición corporal al aumentar la oxidación de ácidos grasos, lo que favorece el catabolismo de lípidos en el hígado y tejido muscular (Flachs et al., 2009). Este mecanismo contribuye a la reducción del tejido adiposo, en especial la grasa visceral (Delgado-Barroso et al., 2022). Los AGPI, EPA y DHA son cruciales durante la gestación debido a su rol en el desarrollo fetal y en la salud materna donde se reportan mejoras en indicadores obstétricos y neonatales como una reducción del riesgo de preeclampsia, partos prematuros y bajo peso al nacer y un impacto positivo en el desarrollo neurológico infantil (Abdelrahman et al., 2022).

Los AGPI omega-6, particularmente el LA, genera uno de los impactos positivos más relevantes en la salud humana por su contribución a la reducción de las lipoproteínas de baja densidad (LDL) (Mozaffarian et al., 2010; Harris et al., 2009). Asimismo, el AA, derivado del metabolismo del LA, es precursor de eicosanoides como prostaglandinas, tromboxanos y leucotrienos, los cuales participan en la regulación de procesos fisiológicos esenciales como la respuesta inmune, la

coagulación sanguínea y la homeostasis vascular (Calder, 2015). Aunque en condiciones fisiológicas normales los omega-6 cumplen un papel indispensable en la salud humana, algunos derivados de su metabolismo como las prostaglandinas de la serie 2, tromboxanos y leucotrienos, actúan como proinflamatorios (Innes & Calder, 2018). Por este motivo, agencias de salud han establecido guías y recomendaciones nutricionales con relación al consumo diario de estos los AGPI omega-3 y omega-6. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) han establecido que la ingesta total de AGPI de cadena larga omega-3, particularmente EPA y DHA, debe ser entre 250 y 500 mg diarios en adultos sanos, a fin de obtener sus beneficios en la salud. En cuanto al consumo de omega-6, la FAO/OMS ha sugerido que la ingesta de LA no debería superar el 9% del total de energía diaria (FAO/WHO, 2010). El balance ideal entre ácidos grasos omega-6 y omega-3 debe situarse entre 1:1 y 4:1, para favorecer un estado antiinflamatorio y protector contra enfermedades crónicas (Simopoulos, 2008). Sin embargo, la dieta occidental presenta una relación omega-6/omega-3 que puede exceder la relación 15:1, muy por encima de la proporción recomendada (Gómez Candela et al., 2015). En México, datos de 2006 muestran una elevada prevalencia de ratios altos en la relación omega-6/omega-3, con valores entre 15.7:1 y 16.7:1 en todas las edades, reflejo de un aporte insuficiente de AGPI omega-3 y exceso de AGPI omega-6 (Ramírez-Silva et al., 2010). Para compensar el déficit en el consumo de estos AGPI, se han desarrollado varias estrategias como: suplementos (cápsulas o líquidos) de aceite de pescado, krill o microalgas, alimentos fortificados (leche, huevos, barras energéticas) y productos funcionales enriquecidos con AGPI omega-3 (Swanson, Block & Mousa, 2012).

2.5 Limitaciones en la fortificación de alimentos con omega-3

A pesar de los amplios beneficios asociados al consumo de ácidos grasos omega-3 en la salud humana, la fortificación de alimentos con concentrados ricos en EPA y DHA presenta limitaciones relevantes relacionadas con la aceptación sensorial, estabilidad oxidativa, biodisponibilidad y seguridad de consumo. El sabor y olor

desagradable característico de los aceites marinos ricos en omega-3 puede disminuir la aceptabilidad del consumidor, debido principalmente a la formación de compuestos volátiles derivados de la oxidación lipídica que generan notas sensoriales asociadas al pescado. Esta problemática representa un desafío importante para su incorporación en alimentos y suplementos alimenticios (Turchini et al., 2022). Adicionalmente, los ácidos grasos EPA y DHA presentan una elevada susceptibilidad a la oxidación debido a su alto grado de insaturación. La oxidación lipídica genera productos primarios, como hidroperóxidos, y productos secundarios, principalmente aldehídos, los cuales deterioran las propiedades sensoriales del alimento y pueden disminuir el valor nutricional de los aceites al afectar la integridad de los ácidos grasos poliinsaturados. Además, algunos productos secundarios de oxidación pueden presentar efectos potencialmente perjudiciales para la salud cuando se acumulan en concentraciones elevadas (Shahidi & Ambigaipalan, 2018). La estabilidad oxidativa de los AGPI omega-3 también representa un desafío durante la digestión. Estudios realizados mediante modelos gastrointestinales *in vitro* han demostrado que alimentos enriquecidos con AGPI omega-3, como huevos y productos lácteos, así como suplementos dietéticos, pueden presentar procesos oxidativos durante las condiciones simuladas de digestión gastrointestinal. Este fenómeno puede ocasionar una disminución de la cantidad de EPA y DHA disponible para su absorción, afectando potencialmente su biodisponibilidad (Miller et al., 2021). Además de los retos tecnológicos asociados con la incorporación de omega-3, es importante considerar que una fortificación excesiva puede generar efectos adversos. Aunque los omega-3 son nutrientes esenciales con importantes beneficios fisiológicos, el incremento de su consumo debe realizarse bajo criterios nutricionales adecuados. Actualmente, no se ha establecido un límite superior tolerable de ingesta para el consumo de EPA y DHA por parte de organismos como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) o la Organización Mundial de la Salud (OMS); sin embargo, se ha señalado que dosis elevadas, particularmente provenientes de suplementos, pueden incrementar el riesgo de alteraciones en la coagulación sanguínea debido a su efecto sobre la agregación plaquetaria, especialmente en personas bajo tratamiento con anticoagulantes o con

trastornos hemorrágicos (EFSA, 2012). La Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) considera que el consumo combinado de EPA y DHA hasta 5 g/día procedente de suplementos es seguro para la población general cuando se utiliza de acuerdo con las recomendaciones establecidas; sin embargo, cantidades superiores pueden requerir supervisión debido a posibles efectos sobre la función plaquetaria y otros procesos metabólicos (FDA, 2019). Asimismo, dosis elevadas de aceites ricos en omega-3 pueden ocasionar efectos gastrointestinales como reflujo, náuseas, diarrea y sensación de sabor a pescado, factores que pueden limitar la aceptación del consumidor y representar una barrera para el desarrollo de alimentos enriquecidos. Por lo anterior, la incorporación de AGPI omega-3 en alimentos funcionales no debe enfocarse únicamente en aumentar su concentración, sino en desarrollar estrategias tecnológicas que permitan proporcionar cantidades nutricionalmente relevantes, mantener su estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento, y favorecer su disponibilidad durante la digestión. En este contexto, los sistemas de encapsulación basados en emulsiones representan una alternativa prometedora para proteger los ácidos grasos poliinsaturados omega-3 frente a la oxidación, reducir los efectos sensoriales indeseables y mejorar su incorporación en matrices alimentarias.

2.6 Microencapsulación de AGPI omega-3

La microencapsulación es una tecnología empleada para recubrir pequeñas partículas o gotas de una sustancia activa (ej., núcleo) con una capa protectora (ej. pared). En general, se busca la preparación de microcápsulas pueden liberar sus contenidos a velocidades controladas bajo condiciones específicas, y la protección del material encapsulado contra factores ambientales. Los métodos de microencapsulación de omegas 3 y 6 más estudiados se describen a continuación:

Secado por aspersión.

Es el método más utilizado para encapsular aceite de pescado a nivel industrial; consiste en la formación de microcápsulas de polvo a partir del secado instantáneo

de una emulsión O/W mediante la atomización con una corriente de aire caliente (Gharsallaoui et al., 2007; Sultana et al., 2023). Tiene alta eficiencia de encapsulación (>70–95%) y mejora la estabilidad oxidativa del aceite encapsulado. Los valores de peróxido de aceite libre después de 30 días de almacenamiento a 25°C (20 hasta 25 meq O_2/kg) se reducen hasta un 70% cuando el aceite es microencapsulado por secado por aspersión (5–7 meq O_2/kg) y almacenado bajo las mismas condiciones (Pérez-Palacios et al., 2022; Sultana, 2023). No obstante, el secado por aspersión tiene algunas limitaciones como la inducción a la oxidación por una exposición térmica prolongada (Sultana, 2023; Rahmani-Manglano et al., 2022). Una alternativa para incrementar la protección contra las altas temperaturas de secado podría ser la formación de múltiples capas de material de barrera en la superficie de las gotas, las cuales actuarían como barrera física contra las altas temperaturas que involucra el proceso de secado por aspersión y además de brindar protección contra el oxígeno (McClements, 2018).

Coacervación compleja

La coacervación compleja es un proceso de encapsulación que se basa en la atracción electrostática entre dos biopolímeros de carga opuesta, generalmente una proteína y un polisacárido, los cuales forman una matriz alrededor del compuesto a proteger. Este método se considera altamente eficiente porque permite atrapar grandes cantidades de aceite y protegerlo de factores que promueven la oxidación, como la luz, el oxígeno o el calor (Tolstoguzov, 2006). En comparación con otros métodos de encapsulación como el secado por aspersión, la coacervación compleja ofrece una barrera física más densa, lo que incrementa la protección antioxidante, se reporta que la coacervación compleja mejora la liberación controlada de omega-3, según el diseño de la pared y aditivos. Por ejemplo, en co-microcápsulas con proteína de suero/goma arábiga y lecitina se observó un grado de lipólisis de ~79.5 % para el aceite algal encapsulado, y una eficiencia de liberación de ácido

docosahexaenoico (DHA) de ~64.8 % en comparación con el aceite libre durante digestión simulada *in vitro* (Eratte et al., 2017; Estudio 2022). En otro estudio con coacervados registró que ~73.4 % del aceite encapsulado se liberó en la fase intestinal (Lentil et al., 2022). Un reto principal en la escalabilidad a nivel industrial de la coacervación compleja es la alta viscosidad de las mezclas formadas por proteínas y polisacáridos, la cual afecta el flujo, la mezcla homogénea y la formación uniforme de microcápsulas. Viscosidades elevadas aumentan los requerimientos energéticos para bombeo, limitan la atomización o dosificación (Timilsena et al., 2019; Koupantsis & Kiosseoglou, 2022).

Liposomas

Los liposomas suelen estar compuestos de fosfolípidos organizados en estructuras de bicapa. Comúnmente, se estructuran con una o más bicapas que se organizan en anillos concéntricos. Conteniendo regiones tanto polares como no polares, por lo tanto, pueden ser usadas para encapsular sustancias hidrófilas e hidrófobas. Se ha documentado que los liposomas pueden conservar más del 60% del contenido de EPA y DHA**,** frente a formulaciones de aceite libre que muestran pérdidas mucho mayores bajo las mismas condiciones durante un almacenamiento de tres semanas (Du, 2022). Uno de los principales desafíos de la tecnología liposómica es la reproducibilidad entre lotes, ya que métodos de preparación tradicionales implican múltiples pasos que tienden a producir diferencias en tamaño de partículas, distribución del tamaño, carga del compuesto encapsulado y comportamiento de liberación entre lotes, dificultando su optimización para aplicaciones farmacéuticas o alimentarias a escala industrial (Peng et al.,2023).

Transportadores lipídicos nanoestructurados (NLC)

Son sistemas coloidales compuestos por una mezcla de lípidos sólidos y líquidos, surfactantes y agua. En ellos, los lípidos en estado líquido (como aceites) se encuentran inmovilizados dentro de una estructura lipídica sólida, formando nanocompartimentos que facilitan la incorporación de compuestos lipofílicos (Godge et al., 2023). Presentan un tamaño de 50-1000 nm y se mantienen estabilizadas en

suspensión acuosa a temperatura ambiente mediante concentraciones relativamente altas de surfactantes (Müller et al., 2002). Los NLC co-encapsulados con α-tocoferol redujeron la formación de hidroperóxidos en un ≈72 %, y los volátiles generados por el proceso de oxidación, propanal y hexanal en aproximadamente 53–57%, comparado con el aceite libre. Esto demuestra una mejora cuantitativa importante en la estabilidad oxidativa en los encapsulados obtenidos por este método (Shahparast et al., 2019). Aunque los transportadores lipídicos nanoestructurados (NLC) ofrecen ventajas notables para la protección y liberación controlada de compuestos bioactivos, su optimización resulta compleja debido a los procesos altamente especializados necesarios para trabajar en el rango nanométrico. Adicionalmente, factores como el polimorfismo de los lípidos, la relación entre lípido sólido y líquido y la reproducibilidad en el escalamiento industrial pueden alterar significativamente la estabilidad del sistema (Mehnert & Mäder, 2012; Wang et al., 2022).

Electrospray

Es una técnica que forma gotas o fibras extremadamente finas mediante la aplicación de un campo eléctrico a una solución que contiene el compuesto bioactivo, permitiendo un control preciso tanto de la morfología como del tamaño. Entre sus ventajas destacan una distribución de tamaño muy uniforme y una alta eficiencia de encapsulación, lo cual mejora la estabilidad y reduce pérdidas por degradación oxidativa u otros factores adversos (Comunian et al., 2024). La técnica de electrospray permite una retención de aceite del 85–90%, en comparación con 70–80% en el encapsulado obtenido por secado por aspersión, también se mostró una reducción de los valores de índice de peróxidos en 30–40 % frente al encapsulado por secado por aspersión y hasta 60–70 % respecto al aceite libre (Rahmani-Manglano et al., 2022). El electrospray requiere caudales muy bajos (µL–mL/h), lo que limita la cantidad de producto generado y dificulta su uso industrial frente a técnicas más productivas como el secado por aspersión (Huang et al., 2021).

Liofilización

Es una técnica de secado en la que una emulsión que contiene el aceite es congelada y, posteriormente, el agua es eliminada por sublimación al vacío; el proceso produce partículas secas altamente porosas que encapsulan el aceite (Pérez-Palacios et al., 2022). En trabajos realizados por medio de esta técnica se reportaron eficiencias de encapsulación de 86.98% para secado por aspersión y 63.29 % para liofilización en una comparación directa de métodos, lo que indica que la liofilización puede tener menor eficiencia de encapsulamiento que secado por aspersión (Yang et al.,2024). Deben considerarse para su aplicación la menor eficiencia de encapsulación y los elevados costos asociados al consumo de energía (Yang et al., 2024; Pérez-Palacios et al., 2022).

2.7 Emulsiones

Las emulsiones son sistemas dispersos termodinámicamente inestables que generalmente están compuestos por dos líquidos inmiscibles (McClements, 2015). Se encuentran compuestas por dos fases, la fase dispersa presente en forma de gotas distribuidas en la fase continua, que es el líquido que rodea a las gotas de la fase dispersa. Las emulsiones simples pueden ser agua en aceite (W/O) o aceite en agua (O/W) (Matos, 2020). Aunque las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables, es posible obtener emulsiones cinéticamente estables mediante el uso de emulsificantes apropiados, la reducción del tamaño de gota y la modificación de la viscosidad de las fases, que retardan los fenómenos de desestabilización como la coalescencia o el cremado (McClements, 2015). Algunas emulsiones son alimentos de origen natural (ej., leche, crema láctea) y otros alimentos procesados (ej., mayonesa, aderezos, mantequilla). Las emulsiones alimentarias son ampliamente utilizadas debido a su papel fundamental en la estructura, apariencia y estabilidad de algunos alimentos además puedes actuar como medios de transporte y protección para compuestos bioactivos.

2.7.1 Formación de las emulsiones

La formación de gotas en una emulsión es un proceso que requiere energía, la cual es suministrada por dispositivos que generan la disrupción de la fase dispersa en forma de gotas como: sistemas agitación de alta cizalla, homogeneizadores de alta presión y homogeneizadores ultrasónicos. El primer paso es la dispersión, proceso mediante el cual una fase se fragmenta en pequeñas gotas y se distribuye dentro de una fase continua. Durante este proceso, se forma el sistema bifásico característico de las emulsiones, aunque las gotas suelen presentar un tamaño heterogéneo y una estabilidad limitada (McClements, 2015). Proceso posterior y/o complementario a la dispersión es la homogenización que se lleva a cabo aplicando energía mecánica intensa en homogeneizadores de alta presión o equipos de ultrasonido, logrando reducir y uniformar el tamaño de las gotas, obteniendo emulsiones más finas y estables. (McClements, 2015). La homogenización puede clasificarse como primaria o secundaria, la homogenización primaria crea una emulsión inicial con gotas relativamente finas y uniformes. La homogenización secundaria es un paso adicional con la finalidad de reducir aún más el tamaño de gota (McClements, 2016).

2.7.2 Procesos de desestabilización de emulsiones

Como mencionamos anteriormente, las emulsiones son sistemas inestables desde el punto de vista termodinámico. Los mecanismos más comunes por los cuales una emulsión puede desestabilizarse son:

- Separación gravitacional (cremado/sedimentación)

Es la separación causada por el movimiento ascendente en emulsiones O/W (cremado; Fig.3) o descendente en emulsiones W/O (sedimentación; Fig.3) de las gotas debido a las diferencias de densidades entre la fase dispersa y la fase continua. De acuerdo con la ley de Stokes, la velocidad de cremado o sedimentación en una emulsión es directamente proporcional al tamaño de la gota de la fase

dispersa y a la diferencia de densidades de las fases dispersa y continua, e inversamente proporcional a la viscosidad de la fase continua (McClements, 2016).

- Floculación

La floculación es el proceso en el cual dos o más gotas se unen para formar un agregado (flóculo) en el cual cada gota retiene su identidad, sin fusionarse, llevando a una disminución en el número de partículas presentes en la emulsión (Fig.3). La floculación puede ser reversible o irreversible, de acuerdo a las fuerzas que mantienen unidas a las gotas. El proceso está controlado por un equilibrio global entre las fuerzas de atracción y de repulsión (McClements, 1999).

- Coalescencia

Se produce por aproximación, choque, deformación y ruptura de la película interfacial; las gotas individuales se unen y forman gotas más grandes (Fig.3). Al incrementar el tamaño de las gotas, se produce una reducción del área interfacial y de manera concomitante una reducción en la energía del Gibbs del sistema. Este proceso depende de la frecuencia, energía y eficiencia de colisión entre gotas, así como también de la resistencia y viscoelasticidad de la película que rodea a las gotas. En emulsiones O/W la coalescencia conduce a la formación de una capa de aceite en la parte superior de la emulsión, mientras que en emulsiones W/O lleva a la acumulación de agua en la parte inferior del sistema (McClements, 2016).

- Inversión de fases

Es el cambio de una emulsión O/W a una W/O o viceversa. Puede producirse por una elevada fracción volumétrica de fase dispersa, por efecto de trabajo mecánico o de la temperatura (McClements,1999).

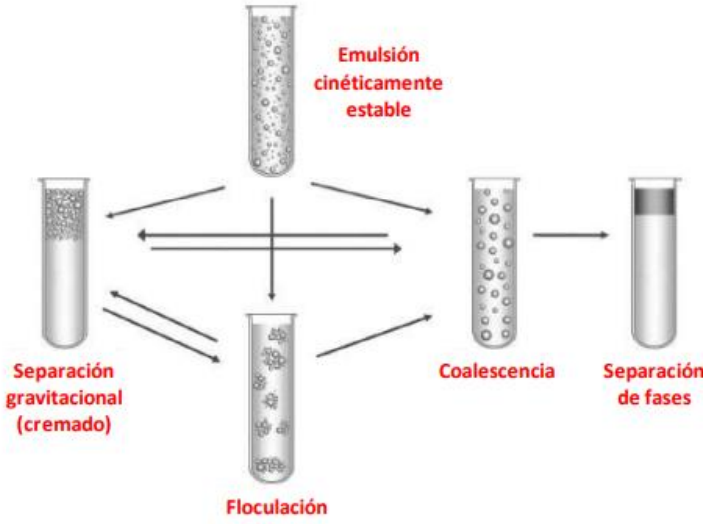


Figura 2. Esquema de los fenómenos de desestabilización más importantes de una emulsión aceite en agua (O/W) (McClements, 2016). Las flechas indican los fenómenos de desestabilización que pueden ocurrir en función del tiempo. En los tubos se ilustran los principales cambios en las gotas de la fase dispersa; el fenómeno de desestabilización ocurrido se indica en la parte inferior de los tubos.

2.7.3 Estrategias para la estabilización cinética de las emulsiones

Para lograr emulsiones con estabilidad cinética prolongada, se emplean diversas estrategias que actúan para retardar o inhibir los mecanismos que llevan a la desestabilización. Una de estas estrategias es el uso de agentes emulsificantes, los cuales reducen la tensión interfacial entre la fase oleosa (apolar) y la fase acuosa (polar). Gracias a su naturaleza anfipática, los emulsificantes interactúan con ambas fases en la interfase, formando una capa protectora alrededor de las gotas dispersas que evita su coalescencia (Muñoz, 2007).

Además de disminuir la tensión interfacial, los emulsificantes pueden estabilizar las emulsiones a través de mecanismos electrostáticos, estéricos o viscoelásticos. En el caso de los emulsificantes iónicos, la repulsión electrostática entre las gotas con carga similar contribuye a mantenerlas separadas, mientras que los emulsificantes no iónicos o poliméricos pueden generar una barrera física (estérica) que impide el

acercamiento de las gotas. Otro mecanismo importante mediante el cual los agentes emulsificantes actúan es la modificación de la viscosidad del medio continuo, especialmente cuando se usan biopolímeros algunos de los cuales incrementan la viscosidad del medio reduciendo la movilidad de las gotas y, por tanto, la probabilidad de coalescencia (McClements, 2015). La combinación de estos mecanismos permite obtener emulsiones con una estabilidad prolongada, ajustable según el tipo y concentración del emulsificante empleado.

La reducción del tamaño de gota es otra de las estrategias más efectivas para mejorar la estabilidad cinética de las emulsiones, ya que influye directamente en la ralentización de los fenómenos de desestabilización como: la coalescencia, el cremado, la sedimentación, el cremado y la maduración Ostwald. Al reducir el diámetro medio de las gotas, se minimiza la velocidad de separación de fases según la Ley de Stokes y se incrementa la estabilidad del sistema, ya que gotas más pequeñas presentan menor tendencia a colisionar o deformarse, lo que reduce la probabilidad de coalescencia (Kupikowska-Stobba et al., 2024).

2.8 Emulsiones multicapa

Las emulsiones multicapa (LbL por su denotación en inglés *layer-by-layer*) constituyen una estrategia avanzada de encapsulación, en la cual las gotas de fase oleosa son rodeadas por múltiples capas sucesivas de biopolímeros, usando las fuerzas de atracción electroestática para su deposición (Guzey *et al.*, 2006). Para su obtención, se genera una emulsión primaria estabilizada por un emulsificante que generalmente es una proteína anfifílica capaz de adsorberse fuertemente en la interfase aceite-agua. Posteriormente se añade un polisacárido, con carga opuesta a la proteína de la capa primaria, que se adsorbe sobre la superficie de las gotas, formando una membrana interfacial secundaria. Es posible deponer un mayor número de capas adicionando capas de biopolímero de carga opuesta a la superficie de la gota (Fig.4). La presencia de estas capas interfaciales sucesivas no solo incrementa el espesor de la membrana en torno a las gotas, sino que también mejora significativamente la estabilidad del sistema frente a variaciones de pH,

fuerza iónica, temperatura y presencia de sales.

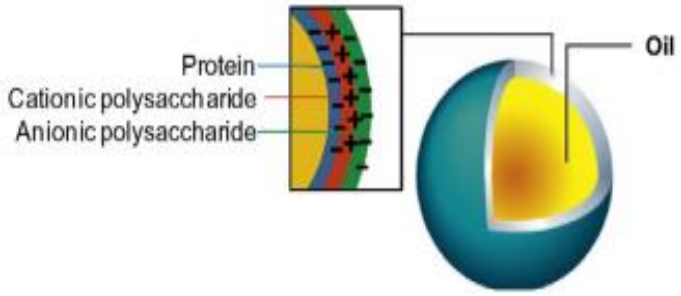


Figura 3. Estructura modelo de una microcápsula. La gota de aceite (oil) se encuentra recubierta en la primera capa con la proteína (emulsificante) cargada de manera negativa, en la segunda capa el polisacárido catiónico y en la última capa el polisacárido aniónico (Burgos-Díaz et al., 2016b).

Las proteínas empleadas en la formación de la emulsión primaria de las emulsiones LbL se seleccionan con base en su solubilidad en agua, capacidad emulsionante, propiedades electrostáticas, acidez de la emulsión, alergenicidad, perfil nutricional, disponibilidad en el mercado, sustentabilidad y costo. La solubilidad acuosa determina la disponibilidad de las proteínas para migrar hacia la interfase aceite-agua y formar películas interfaciales continuas; proteínas con alta solubilidad, como el aislado de proteína de suero, presentan tasas de adsorción superiores y permiten obtener gotas más pequeñas durante la homogenización (McClements, David Julian, 2016). En proteínas vegetales como el aislado de soya, una solubilidad elevada facilita el despliegue molecular y la exposición de dominios hidrofílicos e hidrofóbicos, lo que favorece una adsorción rápida y eficiente en la interfaz aceite-agua, permitiendo la formación de una película interfacial continua y viscoelástica capaz de estabilizar gotas incluso en sistemas con alta proporción de fase oleosa. Además, una mayor solubilidad reduce la tendencia a la agregación proteica, favoreciendo la estabilidad interfacial y la resistencia a fenómenos de desestabilización como coalescencia o cremado (Guo et al., 2025). De manera complementaria, el balance entre regiones hidrofílicas e hidrofóbicas de la proteína

desempeña un papel fundamental en su comportamiento emulsificante. Las regiones hidrofóbicas favorecen la interacción y anclaje de la proteína con la fase oleosa, mientras que las regiones hidrofílicas permanecen orientadas hacia la fase acuosa, promoviendo la estabilización de la interfase. Un adecuado equilibrio entre ambos dominios permite reducir la tensión interfacial y formar películas interfaciales más cohesivas y resistentes frente a fenómenos de coalescencia (Tang, 2017).

La actividad superficial se reconoce como un parámetro central en la selección de proteínas para la formación de emulsiones primarias, debido a que influye significativamente tanto en el tamaño inicial de gota como en la resistencia mecánica de la película interfacial. Una actividad superficial alta implica que la proteína puede adsorberse rápidamente a la interfase aceite-agua, reducir la tensión interfacial y reorganizarse para formar una capa cohesiva, flexible y continua alrededor de las gotas lipídicas, lo cual es esencial para evitar la coalescencia desde los primeros segundos de homogenización (Guo et al., 2025).

Las proteínas animales con estructura globular y elevada afinidad por interfaces hidrofóbicas como la β-lactoglobulina, favorecen la formación de películas viscoelásticas con alta resistencia a la deformación (Amezqueta & López, 2024). No obstante, proteínas vegetales, como el aislado de soya, han demostrado una capacidad emulsionante notable, especialmente cuando presentan alta solubilidad y grados de desdoblamiento estructural que favorecen la exposición de dominios hidrofóbicos, necesarios para la adsorción interfacial (Guo et al., 2025).

Las propiedades electrostáticas son determinantes para la construcción de multicapas en emulsiones LbL, ya que este método requiere la deposición secuencial de biopolímeros con cargas opuestas. Un parámetro clave que gobierna estas interacciones es el potencial Z, el cual refleja la magnitud y signo de la carga superficial de las gotas y determina la fuerza de atracción o repulsión entre capas consecutivas. Cuando el potencial Z de la emulsión primaria presenta un valor elevado ≥±30 mV, se favorece la adsorción controlada del biopolímero con carga opuesta, mientras que valores cercanos a cero aumentan el riesgo de agregación

no deseada debido a la reducción de la repulsión electrostática (Guzey & McClements, 2006). En este contexto, la carga superficial de la proteína determinada principalmente por el pH en relación con su punto isoeléctrico desempeña un papel fundamental en su capacidad de interacción con otros biopolímeros. Dependiendo de su estado de carga, la proteína puede asociarse con polisacáridos aniónicos, como pectina, alginato o goma xantana, así como con polisacáridos catiónicos, como el quitosano. Estas interacciones electrostáticas favorecen la formación de sistemas multicapa estables y estructuralmente organizados (Guzey & McClements, 2006).

Otras consideraciones relevantes en el desarrollo de emulsiones LbL incluyen la alergenicidad de los materiales de pared. Por ejemplo, las proteínas lácteas poseen excelente funcionalidad tecnológica, pero presentan alergenicidad elevada, mientras que proteínas vegetales como las de chícharo representan alternativas hipoalergénicas con ventajas asociadas a la sostenibilidad, aunque generalmente exhiben menor solubilidad y estructuras interfaciales menos compactas (Stone et al., 2015). Finalmente, variables como costo, disponibilidad comercial y sustentabilidad ambiental adquieren relevancia en aplicaciones industriales, donde proteínas vegetales de bajo costo pueden resultar competitivas frente a proteínas lácteas pese a su menor desempeño interfacial.

Los polisacáridos utilizados en la formación de emulsiones multicapa mediante la técnica LbL, cumplen un papel esencial en la estabilización interfacial, ya que proporcionan una segunda capa funcional que mejora la resistencia fisicoquímica del sistema (i.e., oxidación y coalescencia). Su aporte principal se debe a su capacidad para formar películas hidratadas, densas y altamente cohesivas alrededor de las gotas de aceite, lo que disminuye la probabilidad de coalescencia, floculación y desestabilización inducida por cambios ambientales como pH, fuerza iónica o temperatura (Burgos-Díaz et al., 2016b). Además, al incrementar la viscosidad de la fase continua, dificultan la movilidad de las gotas y reducen las colisiones efectivas entre ellas (Burgos-Díaz et al., 2016b). La elección del polisacárido adecuado en sistemas LbL depende de múltiples factores funcionales,

entre los que destacan la carga electrostática, el peso molecular, la rigidez conformacional y la compatibilidad estructural con la proteína utilizada en la emulsión primaria. Los polisacáridos aniónicos como la pectina, la goma arábiga, el alginato, la carboximetilcelulosa o los carragenanos, son ampliamente utilizados debido a su fuerte afinidad electrostática con proteínas cargadas positivamente en condiciones ácidas, lo que favorece la formación de complejos interfaciales ordenados y la deposición secuencial de capas sin causar agregación descontrolada (Dickinson, 2020). En contraste, polisacáridos neutros o ligeramente ramificados, como ciertos galactomananos (ej., goma guar, goma de algarrobo), aportan estabilidad principalmente modulando la viscosidad, más que mediante interacciones electrostáticas específicas.

Las emulsiones multicapa proporcionan una mayor protección contra la oxidación primaria y secundaria en aceites ricos en AGPI omega-3, debido a que las capas sucesivas proteína–polisacárido forman una barrera interfacial densa y electrostáticamente organizada que retarda la difusión de oxígeno y radicales libres hacia el núcleo lipídico (Guzey & McClements, 2006). La multicapa ha logrado reducir los indicadores de oxidación primaria (hidroperóxidos) en más del 60 % y disminuir la generación de TBARS asociados a la oxidación secundaria en aproximadamente 40–55 %, en comparación con emulsiones simples de aceite de pescado (Jiménez-Martín et al., 2016; Gudipati et al., 2010). Además, la repulsión electrostática inducida por el material de pared favorece la repulsión entre gotas y evita fenómenos de floculación y coalescencia, contribuyendo a mantener tamaños de gota más pequeños y uniformes (frecuentemente <300 nm) y, por tanto, generando sistemas cinéticamente estables (McClements, 2015).

Tomando en cuenta el tipo de proteína y polisacárido en la estabilidad oxidativa, a continuación, se presenta la Tabla 1, que resume estudios experimentales relevantes empleando combinaciones específicas de biopolímeros. Mostrando sus efectos sobre el tamaño medio de gota, valores de PV y TBARS. Lo cual nos permite observar cómo la naturaleza de los biopolímeros empleados, influye en la protección oxidativa y funcionalidad de las emulsiones multicapa.

La mayoría de los estudios se centran en el uso proteínas de origen animal. En cuanto a las proteínas de origen vegetal, la mayoría de los estudios se han centrado en las obtenidas de algún tipo de leguminosa, como lo son la proteína de chícharo, soya, garbanzo y lentejas, sin embargo, su carácter alergénico es otro aspecto relevante para su aplicación. También hay estudios realizados con proteínas de avena, pero se enfrenta el mismo problema, el carácter alergénico de las aveninas.

Por esta razón en este trabajo se pretende estudiar una proteína proveniente del grano de arroz, la cual por su misma naturaleza posee un carácter no alergénico, alta digestibilidad y biodisponibilidad de aminoácidos, atributos que favorecen su absorción y utilización metabólica en comparación con otras proteínas vegetales, lo que permite su inclusión en dietas para poblaciones sensibles. Estas propiedades funcionales y nutricionales no solo respaldan el uso de proteína de arroz en formulaciones alimentarias generales, sino que también sugieren beneficios potenciales cuando se emplea como emulsificante primario en sistemas multicapa destinados a proteger compuestos bioactivos como AGPI omega-3, ya que la elección de un emulsionante con buena tolerancia digestiva puede contribuir a una mejor aceptación del producto y a una mejor tolerancia gastrointestinal (Senarathna & Malalgoda, 2024).

Tabla 1. Combinaciones de proteínas vegetales/polisacáridos, valores de PV, TBARS y tamaño de gota en comparación con emulsiones monocapa de AGPI omega-3 a) Chen et al., 2016, b) Tang & Liu 2017 c) Liu et al., 2019 d) Zhang et al., 2021 e) Hernández et al., 2023. f) Guzney & McClements, 2006. g) McClements, 2015 h) Burgos-Díaz et al., 2016b. i) Weinbreck et al., 2010. j) Chen et al., 2021. k) Jiménez-Martín et al., 2016.

Proteína	**Polisacárido**	**Tamaño medio de gota (μm)**	**Efectos de protección de lipídica en AGPI omega-3**
Proteína de soya	Pectina	0.35	Disminución del 30% en TBARS [a].
Proteína de chícharo	Goma arábiga	0.28	PV reducidos en 25% [b].
Proteína de lenteja	Carragenina	0.42	TBARS 40% menores, después de 15 días de almacenamiento [c].
Proteína de avena	Alginato	0.31	PV disminuyó significativamente ($p<0.05$) tras almacenamiento prolongado [d].
Proteína de chícharo	Goma xantana	0.27	TBARS un 35% inferiores [e].
Proteína de garbanzo	Goma arábiga	0,33	PV reducidos en un 30%[f].
Proteína de frijol	Pectina	0.36	TBARS reducidos en un 28%[g].
Proteína de avena	Alginato	0.37	PV reducidos 27%[g].
Proteína de avena	Pectina	0.30	TBARS Reducidos en un 32%[h].
B-lactoglobulina	Pectina	0.25	PV reducidos 45–55%[f].
Aislado de proteína de suero (WPI)	Goma arábiga	0.30	PV reducidos ~50%[i].
Aislado de proteína de suero (WPI)	Alginato	0.35	TBARS Reducidos en un 45–60%[j].
β-lactoglobulina (suero)	Carragenina	0.31	TBARS Reducidos en un ~55%[k].

3. JUSTIFICACIÓN

Los AGPI omega-3 son nutrientes esenciales ampliamente reconocidos por sus efectos benéficos sobre la salud cardiovascular, metabólica y neurológica. No obstante, su incorporación en productos alimentarios se encuentra limitada debido a su alta susceptibilidad a la oxidación, baja solubilidad en medios acuosos, limitada biodisponibilidad por su oxidación en el tracto gastrointestinal y la generación de sabores y aromas indeseables durante el procesamiento y almacenamiento. En este contexto, el desarrollo de sistemas de encapsulamiento comestibles representa una estrategia tecnológica clave para mejorar la estabilidad fisicoquímica y funcional de los AGPI omega-3 en matrices alimentarias. Particularmente, las emulsiones multicapa obtenidas mediante deposición electrostática LbL han demostrado ser sistemas eficaces para proteger compuestos lipídicos bioactivos frente a factores ambientales adversos, como el oxígeno, la temperatura y las variaciones de pH, además de modular su comportamiento durante la digestión.

El uso de proteínas de origen vegetal y polisacáridos como materiales de pared en sistemas multicapa responde a la creciente demanda de ingredientes más sostenibles, seguros y con menor potencial alergénico en comparación con aquellos de origen animal. En este contexto, la proteína de arroz emerge como una alternativa particularmente atractiva debido a su carácter hipoalergénico, alta digestibilidad y adecuada funcionalidad tecnológica, lo que la posiciona como un ingrediente novedoso en el diseño de emulsiones. No obstante, con fines comparativos y de referencia, se emplea también proteína de soya, la cual ha sido ampliamente estudiada por su elevada capacidad emulsificante y su eficiencia en la estabilización de interfaces aceite-agua (Tang, 2017). Por otra parte, la selección de polisacáridos como goma xantana y quitosano se fundamenta en su capacidad para interactuar electrostáticamente con proteínas, favoreciendo la formación de estructuras multicapa más robustas. La goma xantana, de naturaleza aniónica, puede generar interacciones electrostáticas con las proteínas utilizadas para estabilizar la interfase agua-aceite, contribuyendo a incrementar la viscosidad del medio continuo y a mejorar la estabilidad física del sistema, mientras que el

quitosano, polisacárido catiónico, tiene potencial para interactuar con la goma xantana, formando una capa adicional para reforzar la barrera interfacial frente a agentes prooxidantes (Guzey & McClements, 2006; Rinaudo, 2006).

En conjunto, el desarrollo y caracterización de emulsiones multicapa estabilizadas con biopolímeros de origen vegetal en medios ácidos puede constituir una estrategia pertinente para mejorar la estabilidad oxidativa y funcional de los AGPI omega-3 y contribuir al diseño de alimentos funcionales más estables, seguros y alineados con las tendencias actuales de nutrición y sostenibilidad.

4. HIPÓTESIS

Se plantea que las emulsiones O/W multicapa elaboradas con proteínas de arroz o soya, obtenidas mediante deposición electrostática capa por capa (LbL) y estabilizadas con goma xantana y quitosano, presentarán una menor susceptibilidad a la oxidación lipídica de los ácidos grasos poliinsaturados omega-3 en medios ácidos, en comparación con sistemas no encapsulados.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y caracterizar emulsiones O/W multicapa de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 elaboradas con proteínas de arroz o soya como emulsificantes y estabilizadas con quitosano y goma xantana, evaluar su estabilidad fisicoquímica y oxidativa en medios ácidos frente a factores ambientales.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Caracterizar las propiedades electrostáticas y de solubilidad de las proteínas de soya y arroz, con el fin de identificar las condiciones que favorecen la adecuada formación de la emulsión, la atracción electrostática y la formación de interfaces multicapa estables en medios ácidos.

Caracterizar las propiedades electrostáticas de la goma xantana y el quitosano en función del pH, con el fin de identificar las condiciones que favorecen la atracción electrostática con las proteínas de arroz y de soya para la deposición de las multicapas.

Desarrollar emulsiones aceite-en-agua multicapa mediante la técnica de deposición electrostática LbL utilizando proteína de arroz o de soya, goma xantana y quitosano como materiales de pared.

Caracterizar las emulsiones primarias, secundarias y terciarias mediante el análisis de tamaño de gota y potencial Z.

Evaluar la estabilidad oxidativa del aceite rico en AGPI omega-3 libre y del aceite rico en AGPI omega-3 encapsulados en emulsiones multicapa.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Las emulsiones multicapa fueron preparadas con aceite de salmón rico en AGPI omega 3 (All Nature, Noruega). Los materiales de capa empleados fueron: concentrado de proteína de arroz integral (80% proteína; Rice vegan protein; WILDMOUNTAIN, México), concentrado de proteína de soya (80% proteína, Proteína aislada de soya, NAIMA, México), goma xantana (Xantan gum, Burchers, México) y quitosano (99%, SIGMA-ALDRICH, Alemania). El control de pH se realizó mediante soluciones tampón de fosfatos preparados con ácido acético glacial (Jalmek, Mexico) y acetato de sodio (Avantor, México).

6.2 Métodos

6.2.1 Caracterización de los hidrocoloides

6.2.1.1 Medición de potencial Z

El potencial Z de los materiales de capa se determinó en soluciones al 0.05 % p/p, disueltos en tampón de acetatos para el intervalo de pH 2-7. Los biopolímeros dispersos en la solución tampón se mantuvieron en agitación constante durante 4 horas y posteriormente se colocaron en refrigeración (4°C) por 24 h. Después del reposo, se centrifugaron a 9000 rpm por 10 min a 25°C. El sobrenadante fue decantado y filtrado con papel filtro. Los filtrados fueron analizados por triplicado, sin posterior dilución en un equipo Zetasizer Nano (Malvern Instruments Ltd., Londres, UK) con las siguientes condiciones de trabajo, temperatura 25°C, índice de refracción 1.332, constante dieléctrica 78.5, y viscosidad 0.9345 cP.

6.2.1.2. Solubilidad de las proteínas

Para determinar la solubilidad de las proteínas, se pesaron entre 0.5-5.0 %p/p de concentrado de proteína y se dispersaron en la solución tampón de acetato (0.1M/pH 6), se mantuvieron en agitación constante durante 4 horas y posteriormente se colocaron en refrigeración (4°C) por 24 h. Posteriormente fueron centrifugados a 9000 rpm por 10 min a 25 °C. El contenido de proteína soluble en

el sobrenadante fue cuantificado mediante el ensayo de Biuret (Gharsallaoui et al., 2012). En breve, las soluciones sin posterior dilución fueron mezcladas con 2 mL del reactivo de Biuret, dejadas reaccionar en la oscuridad por 10 min, y leídas en un espectrofotómetro UV-VIS a 540 nm. La curva estándar para la cuantificación se realizó empleando como estándar albumina de suero bovino en un intervalo de concentración de 0.1- 6.0 mg/mL a un pH 6. Todas las soluciones fueron analizadas por duplicado.

6.2.1.3 Preparación de las emulsiones multicapa

Las emulsiones primarias fueron preparadas con 2.5% de aceite de pescado rico en AGPI omega-3, disperso en las soluciones de proteína, preparadas como se describe en la Sección 6.2.1.1 Para la formación de la emulsión primaria se dispersó el aceite de pescado con un ultraturrax a 17500 rpm por 90 s, obteniendo así una emulsión gruesa la cual fue homogenizada en un homogeneizador de alta presión (APV 1000, SPX, PAIS) a 250 bar con 3 recirculaciones. Las emulsiones primarias fueron caracterizadas y empleadas para preparar emulsiones secundarias inmediatamente después de su preparación. Las emulsiones secundarias fueron preparadas adicionando 0.5 %p/p de la solución pH 3 de goma xantana al 0.1 % p/v a la emulsión primaria, agitando con un equipo ultraturrax a 17500 rpm por 15 s y homogenizando a 250 bar con 3 recirculaciones. Alícuotas de la emulsión secundaria fueron tomadas inmediatamente de su preparación para determinar su potencial Z y distribución de tamaño de gota. La preparación de la emulsión terciara se realizó con el mismo procedimiento de la preparación de la emulsión secundaria, pero, adicionando 0.5 %p/p una solución pH 3 de quitosano al 0.1 % p/v a la emulsión secundaria.

6.3 Caracterización fisicoquímica de las emulsiones

Una vez obtenidas las emulsiones primarias, secundarias y terciarias se evaluaron los siguientes parámetros: Tamaño de gota, potencial Z y determinación de los productos de oxidación.

6.3.1 Tamaño de gota y potencial zeta

La distribución del tamaño de gota y potencial Z de las emulsiones se midió utilizando la técnica de DLS (Dynamic Light Scattering) en un equipo Zetasizer Nano (Malvern Instruments Ltd., Londres, UK) a 25°C. Para la medición, las emulsiones fueron diluidas 1:20 en una solución tampón de acetatos pH 3. Las condiciones de medición fueron temperatura 25°C, índice de refracción 1.332, constante dieléctrica 78.5, y viscosidad 0.9345 cP. Las mediciones de dispersión de tamaño de gota se realizaron en celdas cuadradas desechables de poliestireno 12 mm (DTS0012, Starstedt, Alemania) y las mediciones de potencial Z en celdas capilares (DTS1070, Malvern, Alemania).

6.3.2 Determinación de productos de oxidación en emulsiones

Para determinar la protección a la oxidación que generan las multicapas fueron determinadas las concentraciones de los productos de oxidación primarios y secundarios, tanto de los aceites sin emulsificar como los aceites extraidos de las emulsiones terciarias. Las emulsiones terciarias y los aceites fueron evaluadas durante 48 h mantenidos a 40 °C al abrigo de la luz. Los productos de la oxidación fueron determinados en las fases oleosas de las emulsiones cada 12 h, monitoreando el contenido de peróxidos (productos primarios de oxidación) y p-anisidina (productos secundarios de oxidación).

6.3.3 Extracción de la fase oleosa de las emulsiones

Para separar la fase oleosa de las emulsiones, las muestras (50 mL) se congelaron a -18 °C por 24 h, se llevaron a temperatura ambiente, se mezclaron con una solución saturada de NaCl (10 mL), se sometieron a agitación manual por 1 min y se volvieron a congelar por 24 h. Posteriormente, los tubos fueron llevados a temperatura ambiente y centrifugados a 9000 rpm por 10 min. El sobrenadante de los tubos (fase oleosa) fue recuperado para las determinaciones de índice de peróxidos y el valor de *p*-anisidina.

6.3.4 Índice de peróxidos

Para determinar el índice de peróxidos se siguió el método descrito según la AOCS Cd 8b-90 (AOCS,1993). Se pesaron 5 g de la materia grasa recuperada en un matraz Erlen Meyer de 250 ml y se adicionaron 30 ml de una mezcla de ácido acético:cloroformo en proporción 3:2, se agitó para suspender la muestra y se adicionaron 0.5 ml de una solución saturada de KI, agitando por un minuto. Posteriormente se adicionaron 30 ml de agua destilada agitando fuertemente para detener la reacción. Se agregaron 0.5 ml de solución de almidón al 1% como indicador y se tituló con tiosulfato de sodio 0.01 N, hasta la desaparición del color oscuro. Para la preparación del blanco se siguió exactamente el mismo procedimiento, pero sin la adición de la materia grasa.

El índice de peróxidos fue calculado por la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{S - B \;\; N * 1000}{W}$$

Donde:

S= volumen, expresado en mL, de titulante gastado en la muestra

B=volumen, expresado en mL, de titulante gastado en el blanco

N = normalidad del tiosulfato de sodio

W= peso, expresado en g, de la muestra de aceite

6.3.5 Valor de p-anisidina

Para determinar el valor de p-anisidina se siguió el método descrito según la AOCS Cd 1890 (AOCS, 1997). Se pesaron 3 gramos de la materia grasa recuperada y se colocaron en un matraz volumétrico de 25 mL aforando con isooctano. Se midió inmediatamente la absorbancia de dicha solución en un espectrofotómetro, usando una celda de cuarzo de 1 cm para su medición. Después se tomaron exactamente

5 mL de la solución isooctano/aceite y 5 mL del isooctano puro, colocándose cada uno en un tubo de ensaye diferente. A cada tubo se les añadió 1 mL del reactivo de p-anisidina y después de 10 minutos de reposo se midió la absorbancia de las soluciones isooctano/aceite/p-anisidina, usando el isooctano como blanco. El uso del blanco permitió corregir la absorbancia atribuible al solvente, asegurando que la señal registrada correspondiera únicamente a los compuestos secundarios de oxidación presentes en la muestra, principalmente aldehídos generados durante la degradación lipídica en fases avanzadas de la oxidación.

Para calcular el valor de p-anisidina se utilizó la siguiente formula:

$$\text{V p-A.} = \frac{25x\ (1.2\ As - Ab)}{m}$$

As= Absorbancia de la solución grasa después de la reacción con el reactivo de p-anisidina.

Ab= Absorbancia de la solución grasa.

m = Masa del aceite.

6.4 Análisis Estadístico

Para evaluar el efecto del tipo de proteína sobre las propiedades (potencial Z y tamaño de partícula) de cada tipo de emulsión (primaria, secundaria y terciaria) se empleó un diseño de un solo factor con dos niveles (soya y arroz). Por otra parte, para evaluar la estabilidad de los ácidos grasos en función del tipo de aceite (3 niveles: Aceite sin emulsificar, aceite extraído de la emulsión terciaria elaborada con proteína de soya y aceite extraído de la emulsión terciaria elaborada con proteína de arroz), con mediciones repetidas en el tiempo (5 niveles: 0,12 ,24, y 36 h). Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el programa STATISTICA versión 10.0.228.8 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA), considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$. Se reportan valores promedio y desviaciones estándar de las mediciones con n=3 réplicas.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Abdelrahman, M. A., Osama, H., Saeed, H., Madney, Y. M., Harb, H. S., & Abdelrahim, M. E. A. (2023). Impact of n-3 polyunsaturated fatty acid intake in pregnancy on maternal health and birth outcomes: Systematic review and meta-analysis from randomized controlled trials. *Archives of Gynecology and Obstetrics, 307*(1), 249–262. https://doi.org/10.1007/s00404-022-06533-0
2. Albuquerque, B. R., Heleno, S. A., Oliveira, M. B. P. P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2021). Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges. *Food & Function, 12*(1), 14–29. https://doi.org/10.1039/D0FO02324H
3. Alkhatib, A., Tsang, C., Tiss, A., Bahorun, T., Arefanian, H., Barake, R., Khadir, A., & Tuomilehto, J. (2017). Functional foods and lifestyle approaches for diabetes prevention and management. *Nutrients, 9*(12), 1310. https://doi.org/10.3390/nu9121310
4. Aluko, R. (2012). Bioactive lipids. En *Functional foods and nutraceuticals* (pp. 23–36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3480-1_2
5. Amagliani, L., O'Regan, J., Kelly, A. L., & O'Mahony, J. A. (2017). The composition, extraction, functionality and applications of rice proteins: A review. *Trends in Food Science & Technology, 64*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.008
6. Aursand, M., Hamre, K., Knutsen, H. K., Maage, A., Arukwe, A., Alexander, J., Amlund, H., Bernhoft, A., Brantsæter, A. L., Eriksen, G. S., Fæste, C. K., Krogdahl, Å., Haugen, M., Hemre, G. I., Lassen, J. F. R., Nerland, A. H., Nesse, L. L., Næss, B., Ringø, E., Ruus, A., Skåre, J. U., Steffensen, I.-L., Sundheim, L., Sverdrup, L. E., Svihus, B., Thomsen, C., Torrissen, O., Østerås, O., Torstensen, B. E., Ørnsrud, R., & Mozuraityte, R. (2011). Description of the processes in the value chain and risk assessment of decomposition substances and oxidation products in fish oils. *Norwegian Scientific Committee for Food Safety, Report 2011:19*.

7. Biesalski, H.-K., Dragsted, L. O., Elmadfa, I., Grossklaus, R., Müller, M., Schrenk, D., Walter, P., & Weber, P. (2009). Bioactive compounds: Definition and assessment of activity. *Nutrition, 25*(11–12), 1202–1205. https://doi.org/10.1016/j.nut.2009.04.023
8. Bernstein, A. M., Ding, E. L., Willett, W. C., & Rimm, E. B. (2021). Effect of long-chain omega-3 fatty acids on cardiovascular outcomes: A systematic review and meta-analysis. *[Datos de publicación por completar]*. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34742741/
9. Burdge, G. C., & Calder, P. C. (2015). Introduction to fatty acids and lipids. *World Review of Nutrition and Dietetics, 112*, 1–16. https://doi.org/10.1159/000365423
10. Burgos-Díaz, C., Piornos, J. A., Wandersleben, T., Ogura, T., Hernández, X., & Rubilar, M. (2016a). Emulsifying and foaming properties of different protein fractions obtained from a novel lupin variety AluProt-CGNA®. *Journal of Food Science, 81*(7), C1699–C1706. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13350
11. Burgos-Díaz, C., Wandersleben, T., Marqués Villavecchia, A. M., & Rubilar, M. (2016b). Multilayer emulsions stabilized by vegetable proteins and polysaccharides. *Current Opinion in Colloid & Interface Science, 25*, 51–57. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.06.014
12. Calder, P. C. (2015). Marine omega-3 fatty acids and inflammatory processes: Effects, mechanisms and clinical relevance. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids, 1851*(4), 469–484. https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2014.08.010
13. Calder, P. C. (2017). Omega-3 fatty acids and inflammatory processes: From molecules to man. *Biochemical Society Transactions, 45*(5), 1105–1115. https://doi.org/10.1042/BST20160474
14. Cantoral, A., Batis, C., & Basu, N. (2017). National estimation of seafood consumption in Mexico: Implications for exposure to methylmercury and polyunsaturated fatty acids. *Chemosphere, 174*, 289–296. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.109

15. Chen, J., Zhang, L., Li, Q., Gao, Y., & Yu, X. (2022). Utilization of Diaphragma Juglandis extract as a natural antioxidant for improving the oxidative stability of soybean oil during deep frying. *Food Chemistry: X, 14*, 100359. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100359
16. Ding, M., Liu, L., Zhang, T., Tao, N., Wang, X., & Zhong, J. (2021). Effect of interfacial layer number on the storage stability and in vitro digestion of fish oil-loaded multilayer emulsions consisting of gelatin particle and polysaccharides. *Food Chemistry, 336*, 127686. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127686
17. Du, Q., Zhou, L., Li, M., Lyu, F., Liu, J., & Ding, Y. (2022). Omega-3 polyunsaturated fatty acid encapsulation system: Physical and oxidative stability, and medical applications. *Food Frontiers, 3*, 239–255. https://doi.org/10.1002/fft2.134
18. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2010). Scientific opinion on dietary reference values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol. *EFSA Journal, 8*(3), 1461. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1461
19. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2012). Scientific opinion on the tolerable upper intake level of EPA, DHA and DPA. *EFSA Journal, 10*(7), 2815. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2815
20. Escribá, P. V., González-Ros, J. M., Goñi, F. M., Kinnunen, P. K. J., Vigh, L., Sánchez-Magraner, L., Fernández, A. M., Busquets, X., Horváth, I., & Barceló-Coblijn, G. (2008). Membranes: A meeting point for lipids, proteins and therapies. *Journal of Cellular and Molecular Medicine, 12*(3), 829–875. https://doi.org/10.1111/j.1582-4934.2008.00281.x
21. Fiedor, J., & Burda, K. (2014). Potential role of carotenoids as antioxidants. *Nutrients, 6*(2), 466–488. https://doi.org/10.3390/nu6020466
22. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation*. FAO.

23. Guzey, D., & McClements, D. J. (2006). Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. *Advances in Colloid and Interface Science, 128–130*, 227–248. https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.021
24. Gudipati, V., Sandra, S., McClements, D. J., & Decker, E. A. (2010). Oxidative stability and in vitro digestibility of fish oil-in-water emulsions containing multilayered membranes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58*(13), 8093–8099. https://doi.org/10.1021/jf101348c
25. Herrera Chalé, F., Betancur Ancona, D., & Segura Campos, M. R. (2014). Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad; péptidos biológicamente activos. *Nutrición Hospitalaria, 29*(1), 10–20. https://doi.org/10.3305/nh.2014.29.1.6990
26. Hunter, R. J. (2001). *Foundations of colloid science*. Oxford University Press.
27. Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces* (3rd ed.). Academic Press.
28. Jiménez-Martín, E., Antequera Rojas, T. A., Gharsallaoui, A., Ruiz Carrascal, J., & Pérez-Palacios, T. (2016). Fatty acid composition in double and multilayered microcapsules of ω-3 as affected by storage conditions and type of emulsions. *Food Chemistry, 194*, 476–486. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.046
29. Koletzko, B., Cetin, I., & Brenna, J. T. (2011). Dietary fat intakes for pregnant and lactating women: An evidence-based approach. *British Journal of Nutrition, 105*(1), 1–9. https://doi.org/10.1017/S0007114510003747
30. Li, M., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2020). Design principles of oil-in-water emulsions with functionalized interfaces: Mixed, multilayer, and covalent complex structures. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 19*(6), 3159–3190. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12622
31. Lu, H.-C., & Mackie, K. (2021). An introduction to the endogenous cannabinoid system. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging, 6*(6), 607–615. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2020.07.016

32. Marten, B., Pfeuffer, M., & Schrezenmeir, J. (2006). Medium-chain triglycerides. *International Dairy Journal, 16*(11), 1374–1382. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.06.015
33. McClements, D. J. (2015). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.
34. Mehnert, W., & Mäder, K. (2012). Solid lipid nanoparticles: Production, characterization and applications. *Advanced Drug Delivery Reviews, 64*, 83–101. https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.021
35. Misheva, M., Johnson, J., & McCullagh, J. (2022). Role of oxylipins in the inflammatory-related diseases NAFLD, obesity, and type 2 diabetes. *Metabolites, 12*(12), 1238. https://doi.org/10.3390/metabo12121238
36. Mocking, R. J. T., Harmsen, I., Assies, J., Koeter, M. W. J., Ruhé, H. G., & Schene, A. H. (2016). Meta-analysis and meta-regression of omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation for major depressive disorder. *Translational Psychiatry, 6*, e756. https://doi.org/10.1038/tp.2016.29
37. Mozaffarian, D., Micha, R., & Wallace, S. (2010). Effects on coronary heart disease of increasing polyunsaturated fat in place of saturated fat: A systematic review and meta-analysis. *PLoS Medicine, 7*(3), e1000252. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000252
38. Mu, H., Song, Z., Wang, X., Wang, D., Zheng, X., & Li, X. (2022). Microencapsulation of algae oil by complex coacervation of chitosan and modified starch: Characterization and oxidative stability. *International Journal of Biological Macromolecules, 194*, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.168
39. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2006). Reglamento (CE) n.º 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 2006, relativo a las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en los alimentos. Diario Oficial de la Unión Europea
40. Pérez-Palacios, T., et al. (2022). Recent developments in the microencapsulation of fish oil and natural extracts: Procedure, quality

evaluation and food enrichment. *Foods, 11*(20), 3291. https://doi.org/10.3390/foods11203291

41. Poblete Jara, C., Mendes, N. F., do Prado, T. P., & de Araújo, E. P. (2020). Bioactive fatty acids in the resolution of chronic inflammation in skin wounds. *Advances in Wound Care, 9*(8), 472–490. https://doi.org/10.1089/wound.2019.1105
42. Rahmani-Manglano, N. E., Tirado-Delgado, M., García-Moreno, P. J., Guadix, A., & Guadix, E. M. (2022). Influence of emulsifier type and encapsulating agent on the in vitro digestion of fish oil-loaded microcapsules produced by spray-drying. *Food Chemistry, 392*, 133257. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133257
43. Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science, 31*(7), 603–632. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001
44. Rinaudo, M. (2008). Main properties and current applications of some polysaccharides as biomaterials. *Polymer International, 57*(3), 397–430. https://doi.org/10.1002/pi.2378
45. Saini, R. K., & Keum, Y.-S. (2018). Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: Dietary sources, metabolism, and significance—A review. *Life Sciences, 203*, 255–267. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.04.049
46. Secretaría de Economía & Secretaría de Salud. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria. Diario Oficial de la Federación.
47. Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annual Review of Food Science and Technology, 9*, 345–381. https://doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850
48. Shahparast, Y., Eskandani, M., Rajaei, A., & Yari Khosroushahi, A. (2019). Preparation, physicochemical characterization and oxidative stability of omega-3 fish oil/α-tocopherol-co-loaded nanostructured lipidic carriers.

Advanced Pharmaceutical Bulletin, 9(3), 393–400. https://doi.org/10.15171/apb.2019.046

49. Sheng, B., Li, L., Zhang, X., Jiao, W., Zhao, D., Wang, X., Wan, L., Li, B., & Rong, H. (2018). Physicochemical properties and chemical stability of β-carotene bilayer emulsion coated with bovine serum albumin and Arabic gum compared to monolayer emulsions. *Molecules, 23*(2), 495. https://doi.org/10.3390/molecules23020495
50. Simopoulos, A. P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine & Pharmacotherapy, 56*(8), 365–379. https://doi.org/10.1016/S0753-3322(02)00253-6
51. Simopoulos, A. P., & DiNicolantonio, J. J. (2016). The importance of a balanced ω-6 to ω-3 ratio in the prevention and management of obesity. *Open Heart, 3*(2), e000385. https://doi.org/10.1136/openhrt-2015-000385
52. St-Onge, M.-P., & Jones, P. J. H. (2002). Physiological effects of medium-chain triglycerides: Potential agents in the prevention of obesity. *The Journal of Nutrition, 132*(3), 329–332. https://doi.org/10.1093/jn/132.3.329
53. Sultana, A., Adachi, S., & Yoshii, H. (2023). Encapsulation of fish oil and essential fatty acids by spray drying. *Sustainable Food Technology, 1*, 827–836. https://doi.org/10.1039/D3FB00099K
54. Swanson, D., Block, R., & Mousa, S. A. (2012). Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life. *Advances in Nutrition, 3*(1), 1–7. https://doi.org/10.3945/an.111.000893
55. Tang, C.-H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57*(12), 2636–2679. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067594
56. 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

57. Valenzuela, R., & Sanhueza, J. (2009). Aceites de origen marino: Su importancia y desafíos en la alimentación. *Revista Chilena de Nutrición, 36*(3), 246–257. https://doi.org/10.4067/S0717-75182009000300007
58. Valenzuela, R., Sanhueza, J., & Valenzuela, A. (2011). Las grasas y aceites en la nutrición humana: Omega-3 y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Nutrición, 38*(3), 356–367. https://doi.org/10.4067/S0717-75182011000300011
59. Weinbreck, F., Tromp, R. H., & de Kruif, C. G. (2010). Whey protein–pectin multilayer emulsions. *Food Hydrocolloids, 24*, 512–519.
60. Wilson, S., Blaschek, K., & de Mejia, E. G. (2005). Allergenic proteins in soybean. *Nutrition Reviews, 63*(2), 47–58.
61. Yang, M., Li, L., Zhu, X., Liang, L., Chen, J., Cao, W., Liu, W., Duan, X., Ren, G., & Liu, Z. (2024). Microencapsulation of fish oil by spray drying, spray freeze-drying, freeze-drying, and microwave freeze-drying: Microcapsule characterization and storage stability. *Journal of Food Science, 89*(6), 3276–3289. https://doi.org/10.1111/1750-3841.17098

10. ANÁLISIS DE SIMILITUD



9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)
- Abstract
- Methods and Materials

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.