

Encapsulación de péptidos: Propiedades bioactivas en alimentos funcionales

Autor

Andrés Felipe Alzate Correa – 1940315

Directora

Alba Mery Garzón García, Ph D.

Codirector

Juan Carlos Gómez Daza, Ph D.

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Alimentos

Cali-Colombia

2025

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
2. Planteamiento y formulación del problema	5
2.1 Justificación	5
3. Objetivos	6
3.1 General	6
3.2 Específicos	6
4. Hipótesis	7
5. Antecedentes	7
6. Análisis bibliométrico	10
6.1 Introducción	10
6.2 Metodología	10
6.3 Resultados	11
6.3.1 Evolución anual de publicaciones	11
6.3.2 Tipos de documentos más relevantes	11
6.3.3 Temáticas más relevantes	12
6.3.4 Autores más citados	12
6.3.5 Instituciones y países líderes	13
6.3.6 Palabras clave más frecuentes	13
6.3.7 Análisis de coautoría y co-ocurrencia	14
6.3.8 Coautoría	14
6.3.9 Co-ocurrencia respecto a palabras clave	14
6.4 Discusión de resultados	15
7. Marco teórico	16
7.1 Encapsulación de compuestos bioactivos	16
7.2 Definición y principio activo de la encapsulación	16
7.3 En que consisten las tecnologías de micro y nanoencapsulación	16
7.4 Péptidos bioactivos	18
7.5 Biodisponibilidad	19
7.6 Bioaccesibilidad	19
7.7 Bioactividad	19

8. Tipos de encapsulación	20
8.1 Microencapsulación	20
8.2 Nanoencapsulación	20
8.3 Discusión crítica de las tecnologías de encapsulación	21
9. Materiales de pared en la encapsulación de péptidos	22
9.1 Carbohidratos	22
9.2 Proteínas	23
9.3 Lípidos	25
9.4 Polímeros sintéticos biocompatibles	26
10. Perspectivas futuras e innovación en encapsulación de péptidos	28
11. Alimentos funcionales	29
12. Análisis de hallazgos generales	31
13. Conclusión	32
Referencias	33

1. Introducción

En las últimas décadas, ha aumentado significativamente el interés en el desarrollo de alimentos funcionales; aquellos que, además de cubrir necesidades nutricionales básicas, ofrecen beneficios adicionales para la salud, como la modulación inmunológica, la reducción de procesos inflamatorios y la prevención de enfermedades crónicas (Shahnaz et al., 2024). Dentro de este campo, la encapsulación de compuestos bioactivos se ha consolidado como una estrategia tecnológica esencial para mejorar la estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad de sustancias sensibles, como los péptidos. Los procesos de encapsulación consisten en recubrir o atrapar un compuesto activo dentro de una matriz o material de pared, lo que permite protegerlo frente a factores ambientales como la luz, el oxígeno, el pH o la temperatura, y facilitar su liberación controlada en el organismo o en el alimento (Jacquier et al., 2024). Entre las tecnologías más empleadas se destacan la microencapsulación que utiliza métodos como el secado por aspersión y la liofilización y la nanoencapsulación, basada en técnicas como la nanoprecipitación, la nanoemulsificación y la coacervación. Estas tecnologías, además de preservar la integridad de los péptidos bioactivos, amplían las posibilidades de aplicación en matrices alimentarias, favoreciendo la innovación en el desarrollo de alimentos funcionales (Altaf, 2024). En este contexto, los alimentos funcionales han adquirido gran relevancia debido a su capacidad para trascender el aporte nutricional convencional, proporcionando efectos beneficiosos adicionales para la salud, entre estos destacan la actividad antioxidante y anti-inflamatoria, atribuida a compuestos bioactivos como los péptidos, los cuales se encuentran de forma natural en diversas fuentes alimentarias (Peighambaroust et al., 2021). Estos péptidos poseen la capacidad de armonizar funciones fisiológicas en el organismo, lo que los convierte en ingredientes estratégicos en el diseño de alimentos orientados a la promoción de la salud y el bienestar integral. (Vioque & Millán, 2006). Sin embargo, la aplicación de péptidos bioactivos en alimentos funcionales enfrenta importantes desafíos. Su estabilidad se ve comprometida por factores ambientales como la temperatura, el pH y la luz, lo que pueden llevar a su degradación durante el procesamiento y almacenamiento. Además, presenta una baja biodisponibilidad, lo que significa que una fracción limitada del péptido es absorbida y utilizada por el organismo tras su consumo (Fernández, 2022). Estas limitaciones han llevado a la exploración de nuevas estrategias que permitan optimizar la entrega y la funcionalidad de los péptidos en matrices alimentarias. Una de las soluciones más prometedoras es la encapsulación, una técnica que permite incorporar los péptidos dentro de una matriz protectora, mejorando su estabilidad, protegiéndolos de condiciones adversas, y permitiendo una liberación controlada en el tracto digestivo (Barrios, 2019). Existen diversas tecnologías de encapsulación, como la microencapsulación (mediante secado por aspersión y liofilización) y la nanoencapsulación (mediante nanoprecipitación y nanoemulsificación), que ofrecen diferentes beneficios en función de las características del compuesto bioactivo y el alimento en el que se incorporará (Fernández, 2022). Las selecciones adecuadas de los materiales de pared para la encapsulación, como carbohidratos, proteínas, lípidos y polímeros sintéticos, es fundamental para garantizar la eficiencia de este proceso (Kailasapathy, 2009). Estos materiales actúan como barreras físicas y químicas que protegen a los péptidos durante el procesamiento, almacenamiento y

consumo del alimento, contribuyendo a su liberación controlada en el organismo (Pulido & Beristain, 2010). Este trabajo tiene como objetivo analizar tecnologías de encapsulación más relevantes, evaluando su impacto en la estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad de estos compuestos en alimentos funcionales. se realizará un análisis comparativo de las tecnologías de encapsulación y los materiales de pared, así como una revisión de las investigaciones previas que han abordado su efectividad y aplicaciones en la industria alimentaria. de este modo, se busca proporcionar una visión integral de como método para optimizar el uso de péptidos en la formulación de alimentos con beneficios adicionales para la salud.

2. Planteamiento y formulación del problema

los péptidos bioactivos han despertado un gran interés por sus posibles efectos positivos en la salud, incluyendo capacidades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias. sin embargo, su uso en alimentos funcionales está limitado por varios factores, incluidos su baja estabilidad frente a condiciones ambientales y su limitada biodisponibilidad sino también por los altos costos asociados a la implementación de tecnologías de encapsulación, que pueden dificultar su aplicabilidad a escala industrial (Gonzales & García, 2015; Pérez & Gómez, 2020). La encapsulación ha surgido como una alternativa tecnológica viable para proteger estos compuestos y mejorar su funcionalidad en alimentos, especialmente mediante microencapsulación y nanoencapsulación (Pérez & Gómez, 2020). A pesar de los avances en las tecnologías de encapsulación, existen retos significativos, como la elección adecuada de los materiales de pared y las condiciones óptimas de procesamiento, que afectan la eficiencia de encapsulación y la liberación controlada de los péptidos (López et al, 2012). Además, las diferentes técnicas de encapsulación, como el secado por aspersión, la liofilización y la nanoprecipitación, presentan distintos beneficios y limitaciones que deben ser evaluados en términos de costo, viabilidad industrial y conservación de las propiedades bioactivas (Deladino et al, 2008). Por lo tanto, es fundamental realizar análisis detallado de las tecnologías disponibles, materiales de pared más adecuados y las aplicaciones potenciales en alimentos funcionales, para maximizar el impacto positivo de los péptidos bioactivos en la salud humana. El principal problema a resolver es, como la inestabilidad y degradación de los péptidos bioactivos durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos funcionales limitan su efectividad biológica y reducen su potencial como compuestos promotores de la salud. Teniendo en cuenta lo mencionado previamente, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son las ventajas de las tecnologías de microencapsulación y nanoencapsulación en la mejora de la estabilidad y la vida útil de los péptidos bioactivos en alimentos funcionales?

¿Cómo influyen las tecnologías de encapsulación y los materiales de pared en la protección, estabilidad y liberación controlada de los péptidos bioactivos?

¿Qué impacto tiene la encapsulación de péptidos en la biodisponibilidad y bioactividad de estos compuestos en alimentos funcionales?

2.1 Justificación

La industria alimentaria ha experimentado debido al creciente interés por alimentos que, además de nutrir, contribuyen activamente al bienestar general y la prevención de enfermedades. (Jacquier, 2024). En este contexto, los péptidos bioactivos han demostrado tener propiedades biológicas valiosas, como actividad antioxidante, antimicrobiana,

antihipertensiva y antiinflamatoria (Peighambardoust et al., 2021). Sin embargo, su uso en la formulación de alimentos está limitado por su inestabilidad ante las condiciones de procesamiento y almacenamiento, así como por su baja biodisponibilidad en el organismo (Atma et al., 2024). La encapsulación de péptidos bioactivos emerge como una solución eficaz a estos retos. Mediante esta técnica, los péptidos pueden ser protegidos contra factores ambientales y liberados de forma controlada, lo que no solo mejora su estabilidad, sino que también incrementa su biodisponibilidad y preserva su bioactividad (Aguilar-Toalá et al., 2022). Las tecnologías de encapsulación, como la microencapsulación y la nanoencapsulación, han demostrado su potencial en la industria de alimentaria, pero aún persisten desafíos relacionados con la selección adecuada de materiales de pared, así como la optimización de las técnicas de encapsulación en función del tipo de péptido y del producto alimentario (Guzmán, 2024). Por otra parte, la microencapsulación (a través del secado por aspersión y la liofilización) y la nanoencapsulación (mediante nanoprecipitación y nanoemulsificación) ofrecen soluciones diferenciales que pueden afectar la eficiencia de la encapsulación, y, por lo tanto, el desempeño de los alimentos funcionales (Li et al., 2023). Se requiere una revisión exhaustiva y actualizada de las tecnologías de encapsulación disponibles, los materiales de pared más efectivos y sus aplicaciones en alimentos funcionales. De esta forma, se aportará información valiosa para optimizar la formulación de alimentos con péptidos bioactivos, garantizando su estabilidad y funcionabilidad, lo que puede traducirse en productos con un mayor valor añadido para los consumidores (Atma et al., 2024). Asimismo, esta investigación busca contribuir al conocimiento científico sobre la encapsulación de compuestos bioactivos, permitiendo a los profesionales del sector alimentario tomar decisiones más informadas respecto a tecnologías y materiales más adecuados para la creación de productos que respondan a las demandas del mercado, mejoren la salud de los consumidores y aporten innovaciones a la industria alimentaria.

3. Objetivos

3.1 General

Analizar las tecnologías de encapsulación y su impacto en la estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad de los péptidos en alimentos funcionales.

3.2 Específicos

- Identificar y describir las tecnologías de encapsulación más utilizadas para péptidos bioactivos, incluyendo el secado por aspersión, la liofilización, la nanoprecipitación, electroaspersión y nanoemulsificación.
- Evaluar la influencia de los materiales de pared, como carbohidratos, proteínas, lípidos y polímeros sintéticos biodegradables, en la protección, estabilidad y liberación controlada de péptidos bioactivos en alimentos funcionales.

- Comparar los efectos de la encapsulación sobre la estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad de los péptidos, destacando sus ventajas y limitaciones de las distintas tecnologías en el contexto de alimentos funcionales.

4. Hipótesis

La encapsulación de péptidos bioactivos mediante distintas técnicas de microencapsulación y nanoencapsulación, utilizando materiales de pared como carbohidratos, proteínas, lípidos y polímeros, mejora significativamente su estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad en alimentos funcionales.

5. Antecedentes

Con el avance de la ciencia de los alimentos, ha habido un creciente interés en el uso de péptidos bioactivos en el desarrollo de alimentos funcionales debido a sus beneficios para la salud, tales como sus propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y antihipertensivas (Peighambardoust et al., 2021). Aunque los péptidos bioactivos están presentes de forma natural en proteínas, su eficacia depende de protegerlos frente a condiciones adversas como acidez, enzimas digestivas y oxidación que afectan su estabilidad y biodisponibilidad (McClements, 2018). En respuesta a estos desafíos, la encapsulación de péptidos bioactivos ha surgido como una técnica prometedora. La encapsulación protege los compuestos bioactivos dentro de una matriz que los aísla de factores externos, permitiendo una liberación controlada y dirigida de los péptidos en el sistema digestivo (Augustin & Hemar, 2009). Esta técnica ha demostrado mejorar la estabilidad de los péptidos durante el almacenamiento y procesado, así como aumentar su biodisponibilidad y preservar su bioactividad (Zhang et al., 2015). Entre las técnicas más comunes de encapsulación se encuentran la microencapsulación y nanoencapsulación. La microencapsulación ha sido ampliamente utilizada en la industria alimentaria y farmacéutica debido a su capacidad para encapsular una amplia gama de ingredientes bioactivos mediante procesos como el secado por aspersión y la liofilización (Gharsallaoui et al., 2007). Por su parte, la nanoencapsulación ha ganado interés debido a la reducción del tamaño de las partículas, lo que permite una mayor superficie de contacto y una liberación más eficiente de los péptidos en el sitio de acción (Shah et al. 2016). En la literatura, diversos estudios han explorado las ventajas de la encapsulación de péptidos en alimentos funcionales. Por ejemplo, investigaciones como las de Zhang et al., (2018) han demostrado que la encapsulación de péptidos antioxidantes mediante nanoemulsificación mejoran su estabilidad y su actividad en el tracto digestivo. Otros estudios, como los realizados por Silva et al., (2020), han evaluado el uso de técnicas de coacervación para encapsular péptidos con propiedades antimicrobianas, logrando una liberación controlada en productos cárnicos.

A pesar de los avances en el campo de la encapsulación, aún existen desafíos relacionados con la optimización de las técnicas y selección de materiales de pared adecuados para maximizar la funcionalidad de los péptidos encapsulados en alimentos. Finalmente, las tablas 1 y 2 que recopilan antecedentes de investigaciones relacionadas con la microencapsulación y la nanoencapsulación en alimentos funcionales, destacando los resultados más relevantes obtenidos en cada estudio.

Tabla 1.

Técnica	Objetivo de investigación	Resultados relevantes	Alimento funcional	Referencia
Secado por aspersión	Evaluar la estabilidad de los péptidos encapsulados en carbohidratos mediante secado por aspersión.	Ayuda a conservar los péptidos encapsulados, manteniendo su funcionalidad dentro del alimento procesado.	Yogur probiótico.	(Barbosa-Cánovas et al., 2019).
Liofilización	Estudiar el impacto de la liofilización sobre las propiedades bioactivas de los péptidos encapsulados en proteínas.	La liofilización preserva las propiedades antioxidantes de los péptidos encapsulados.	Barras de cereales con antioxidantes.	(Shu et al., 2020).
Coacervación	Evaluar a coacervación para encapsular péptidos antioxidantes en matrices de gelatina y goma arábica.	Se logra una liberación sostenida y protección de los péptidos contra la oxidación.	Bebidas energéticas.	(Fan et al., 2020).
Secado al vacío	Determinar la eficiencia de la microencapsulación de péptidos en lípidos mediante secado al vacío.	Se mejora la protección de los péptidos en condiciones adversas de almacenamiento.	Suplementos funcionales en polvo.	(Cano-Higueta et al., 2019).
Atomización (Spray con coacervación)	Mejorar la bioaccesibilidad de péptidos mediante atomización y coacervación para encapsular péptidos en lácteos.	Se mejora la solubilidad y la bioaccesibilidad de los péptidos en productos lácteos.	Leche funcional enriquecida con péptidos.	(Zhang et al., 2020).

Microondas	Estudiar la encapsulación de péptidos bioactivos utilizando secado por microondas con matrices de carbohidratos y proteínas.	La técnica ofrece un encapsulado más eficiente y tiempos de secado más cortos.	Barritas proteicas con péptidos funcionales.	(García et al., 2016).
------------	--	--	--	------------------------

*Fuente: Elaboración propia
Año: 2025*

Tabla 2.

Técnica	Objetivo de investigación	Resultados relevantes	Alimento funcional	Referencia
Nanoprecipitación	Evaluar el uso de nanoprecipitación para encapsular péptidos en polímeros y mejorar su biodisponibilidad.	Mejora la biodisponibilidad de los péptidos encapsulados en sistemas alimentarios.	Bebidas deportivas.	(Zhang et al., 2019).
Nanoemulsificación	Desarrollar nanoemulsiones para encapsular péptidos con propiedades antimicrobianas en productos lácteos.	Aumenta la estabilidad y efectividad antimicrobiana en productos lácteos.	Yogur probiótico antimicrobiano.	(Shu et al., 2020).
Coacervación	Estudiar la coacervación para la nanoencapsulación de péptidos antioxidantes en polímeros de quitosano y alginato de sodio.	Se observó una liberación controlada estable de los péptidos en matrices alimentarias.	Zumos funcionales con antioxidantes encapsulados.	(Liu et al., 2024).
Electroaspersión	Optimizar el proceso de electroaspersión para encapsular péptidos bioactivos en polímeros biocompatibles.	Se consigue una liberación controlada de los péptidos en productos cárnicos.	Embutidos cárnicos funcionales enriquecidos con péptidos	(Xu et al., 2021).
Nanoprecipitación de proteínas	Crear nanopartículas de proteínas para encapsular péptidos con propiedades funcionales.	Las nanopartículas mejoran la biodisponibilidad de los péptidos encapsulados en matrices alimentarias.	Productos lácteos con nanopartículas proteicas.	(Ozcan et al., 2021).

Nanoliposomas	Investigar el uso de liposomas para encapsular péptidos y mejorar su estabilidad en bebidas funcionales.	Los liposomas proporcionan protección y estabilidad a los péptidos en bebidas funcionales.	Bebidas energéticas funcionales.	(Guo et al., 2021).
---------------	--	--	----------------------------------	---------------------

Fuente: Elaboración propia
Año: 2025

6. Análisis bibliométrico

6.1 Introducción

El análisis bibliométrico es una herramienta esencial para comprender la evolución, alcance y tendencias de la producción científica en un área de investigación específica. En el contexto de esta monografía, se realizó un estudio bibliométrico enfocado en las tecnologías de encapsulación de péptidos bioactivos y su aplicación en alimentos funcionales. Esta revisión cuantitativa permite identificar los países, autores, instituciones, revistas y términos más relevantes relacionados con la micro y nanoencapsulación de péptidos, lo cual contribuye a establecer una base sólida para la elaboración del marco teórico, la identificación de vacíos de la investigación y la justificación del enfoque temático. Para este fin, se empleó la base de datos Scopus y el software VOSviewer, que permite construir y visualizar mapas de conocimiento a partir de datos bibliográficos.

6.2 Metodología

Para realizar este estudio, se utilizó la base de datos Scopus en mayo del 2025, aplicando herramientas de visualización como VOSviewer para identificar relaciones entre palabras clave, autores y centros de investigación. Se emplearon los términos de búsqueda en inglés “*Peptide encapsulation*”, “*bioactive*”, “*functional foods*”, “*microencapsulation and nanoencapsulation*”, “*wall materials in encapsulation*”, en los campos título, resumen y palabras clave. Se incluyeron artículos originales, revisiones y documentos científicos publicados hasta el año 2024, sin restricción de idioma.

Se extrajeron un total de 118 publicaciones pertinentes, las cuales fueron procesadas y analizadas mediante el software VOSviewer (versión y año), con el fin de visualizar redes de coocurrencia de términos, colaboración entre autores e instituciones y frecuencia de palabras clave. Los criterios de inclusión consideraron estudios relacionados directamente con el uso de técnicas de micro y nanoencapsulación (por ejemplo, secado por aspersión, liofilización, electroaspersión, nanoprecipitación y nanoemulsificación) aplicadas a péptidos en sistemas alimentarios.

6.3 Resultados

6.3.1 Evolución anual de publicaciones

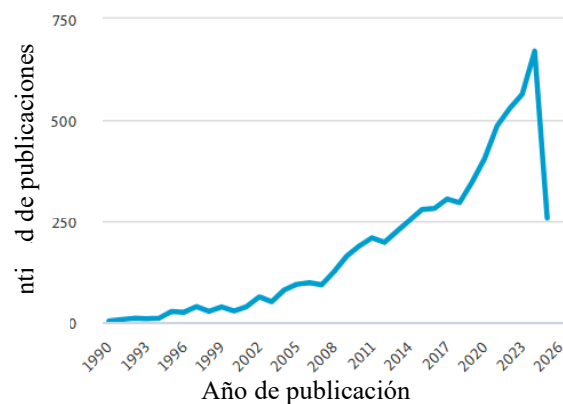


Figura 1. Cantidad de documentos encontrados.

Fuente: Scopus, 2025

6.3.2 Documentos más relevantes

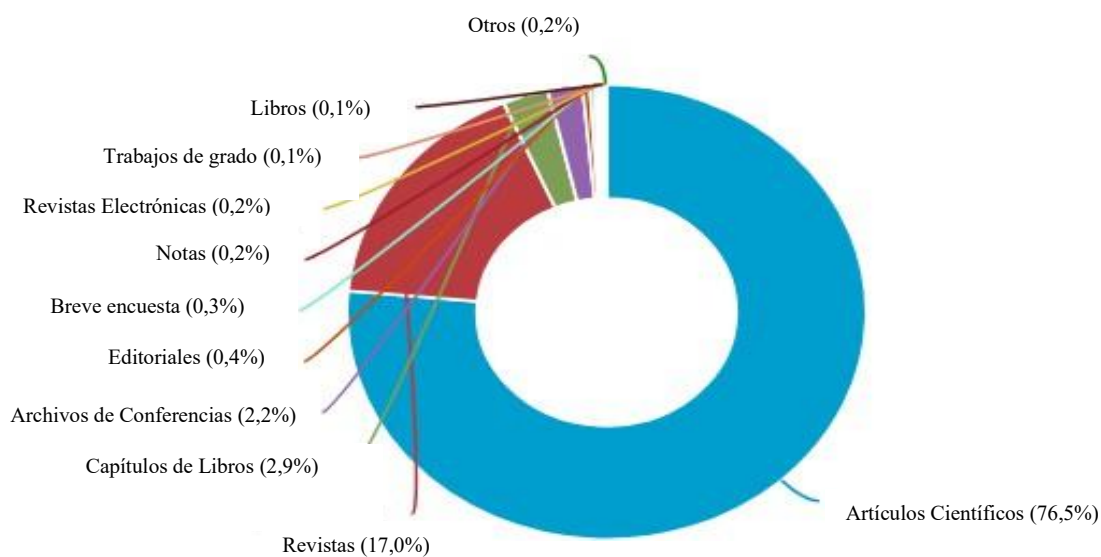


Figura 2. Tipos de documentos consultados

Fuente: Scopus, 2025

6.3.3 Temáticas más relevantes

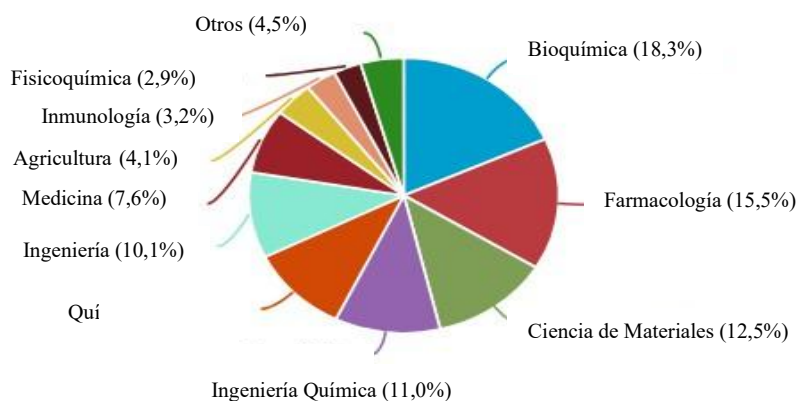


Figura 3. Tipos de documentos por área temática.
Fuente: Scopus, 2025

6.3.4 Autores más citados o productivos

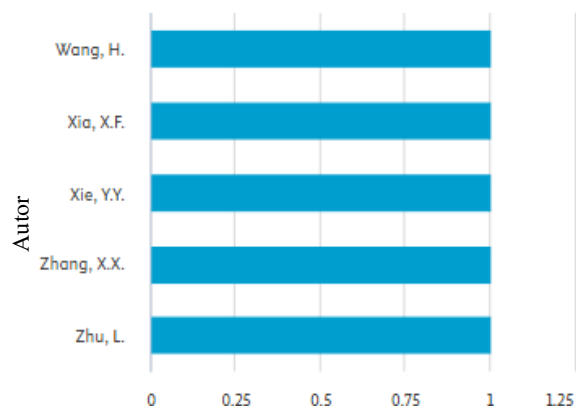


Figura 4. Documentos por autor.
Fuente: Scopus, 2025

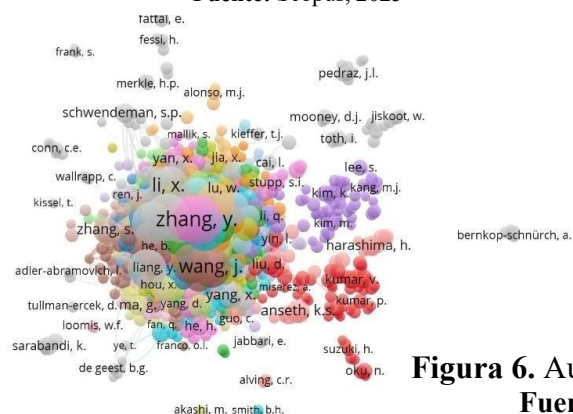


Figura 6. Autores más frecuentes
Fuente: Scopus, 2025

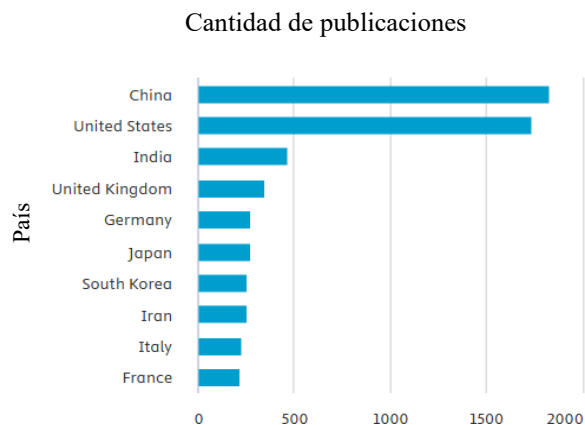


Figura 5. Tipos de documentos por afiliación.

Fuente: Scopus, 2025.

Figura 6. Tipos de documentos por país.

Fuente: Scopus, 2025.

6.3.6. Palabras claves más frecuentes

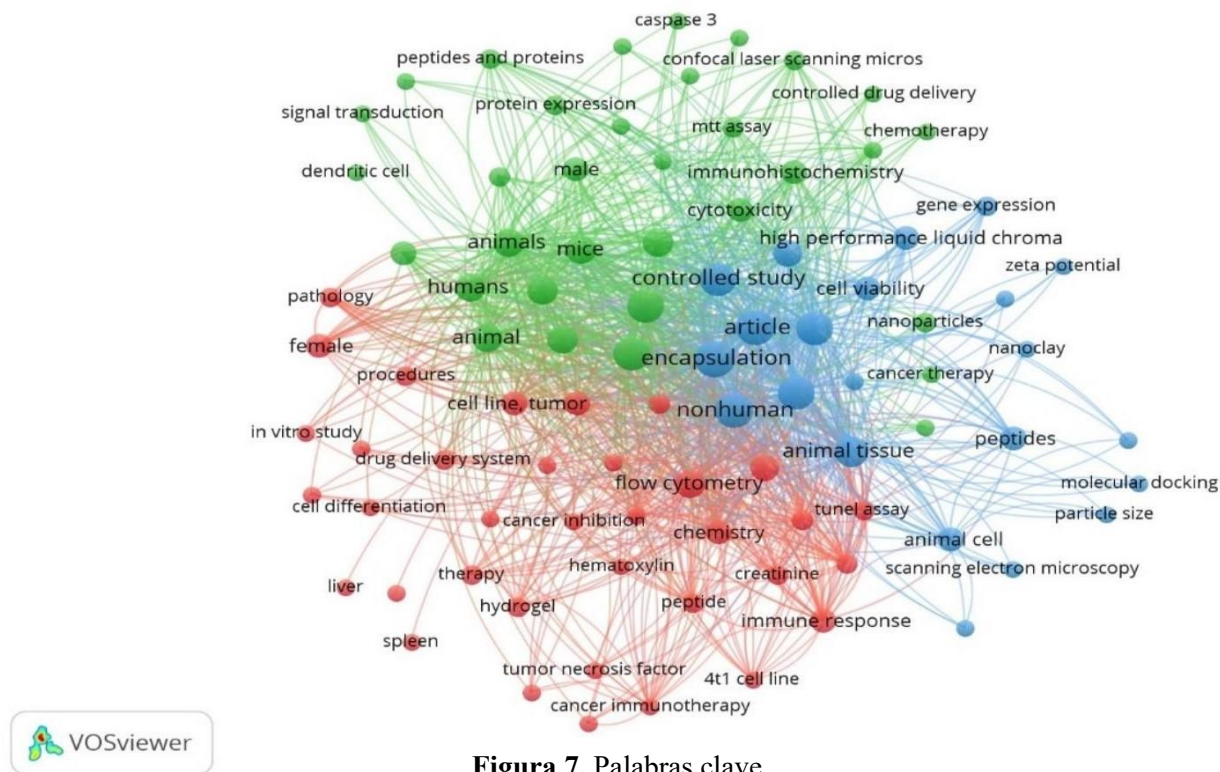


Figura 7. Palabras clave

Fuente: Scopus, 2025

6.3.7 Análisis de coautoría y co-ocurrencia

6.3.8 Coautoría

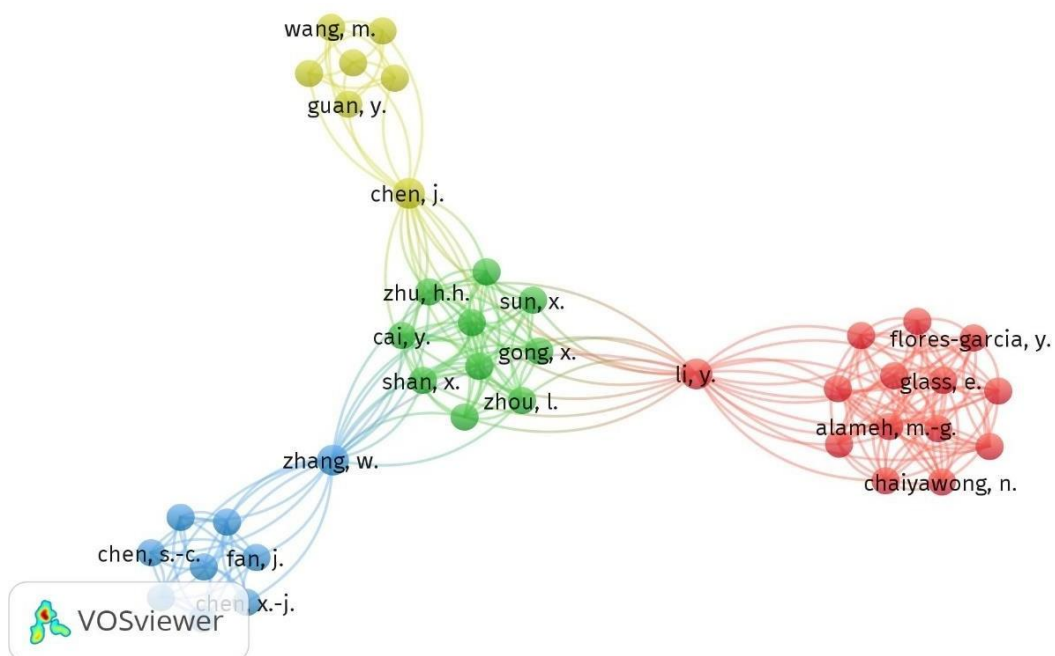


Figura 8. Coautoría.
Fuente: Scopus, 2025

6.3.9 Co-ocurrencia

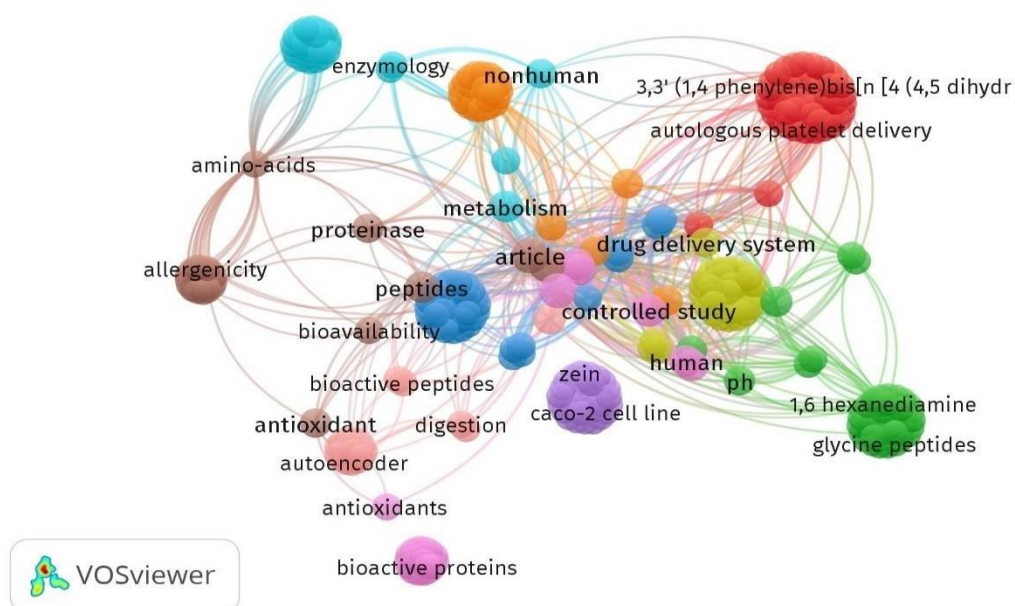


Figura 9. Co-ocurrencia.
Fuente: Scopus, 2025

6.4 Discusión de resultados

El análisis bibliométrico realizado en esta monografía permitió obtener una visión global y cuantitativa de estado actual de la investigación sobre encapsulación de péptidos bioactivos en alimentos funcionales, empleando datos extraídos de la base de datos Scopus y visualizados mediante el software VOSviewer. Un resultado relevante fue el crecimiento sostenido en la producción científica durante los últimos diez años, evidenciando un interés creciente en tecnologías de encapsulación de péptidos con un crecimiento sostenido en el año 2015 y un pico significativo en el año 2023. Este patrón refleja un interés creciente en la comunidad científica por abordar los retos asociados a estabilidad, biodisponibilidad y funcionalidad de los péptidos bioactivos, factores críticos en el desarrollo de alimentos funcionales avanzado (Aguilar-Toalá et al, 2017). A nivel de distribución geográfica, los países con mayor productividad científica fueron China, India, Brasil y Estados Unidos. Esta diversidad regional refleja no solo el interés global por la temática, sino también la consolidación de grupos de investigación en regiones con alta demanda de soluciones nutricionales innovadoras. Las instituciones líderes en publicaciones incluyen la Chinese Academy of Sciences, la Universidad de Sao Paulo y la University Collage Dublín, posicionadas como referentes en biotecnología alimentaria y nanotecnología. Respecto a las revistas científicas más influyentes, destacan *Journal of Functional Foods*, *Food Chemistry* y *Food Hydrocolloids*, todas indexadas en cuartiles superiores (Q1), lo que demuestran la alta calidad de las publicaciones relacionadas con la encapsulación de péptidos. Estas revistas han servido como plataformas clave para divulgar avances tanto en técnicas emergentes como en aplicaciones industriales. El estudio de coocurrencia de términos mostró temas recurrentes relacionados con las tecnologías de encapsulación. En particular, ciertos métodos se han destacado por su capacidad para fortalecer tanto la estabilidad estructural como funcional de los péptidos. Las palabras clave predominantes incluyeron conceptos como péptidos bioactivos encapsulación, secado por aspersión, entre otros, lo cual evidencia las líneas temáticas más investigadas. Estos conceptos agrupan subtemas asociados al uso de tecnologías específicas de encapsulación, la protección funcional de los compuestos y su incorporación en matrices alimentarias. Este patrón temático sugiere que las tecnologías como el secado por aspersión, nanoemulsificación y nanoprecipitación han ganado gran protagonismo por su eficiencia en mejorar la estabilidad estructural y funcional de los péptidos (Alasalvar C, et al., 2020). En cuanto al análisis de coautoría se identificaron redes colaborativas sólidas entre investigadores, lo cual es indicativo de una comunidad activa y multidisciplinaria. Sobresalen autores como Zhang H., Augustin M.A. y Singh H., quienes han publicado en colaboración con instituciones académicas de alto nivel. Este tipo de interacción impulsa la generación de nuevo conocimiento y la transferencia tecnológica en el área de la encapsulación alimentaria (Agyei, D et al. 2015). Por otro lado, el análisis también reveló áreas aun poco exploradas. Por ejemplo, tecnologías como la electroaspersión y el uso de materiales de pared inteligentes aparecen con menor frecuencia, lo que representa una oportunidad de investigación futura.

La baja coocurrencia de ciertos términos también puede interpretarse como un indicio de que aún existen vacíos en la implementación de estas tecnologías a escala industrial o en su validación regulatoria (Grijalva-Verdugo et al. 2018).

En conjunto, los hallazgos bibliométricos respaldan a relevancia de esta monografía al evidenciar que la encapsulación de péptidos bioactivos es un campo en auge, interdisciplinario y con amplias posibilidades de innovación. La integración de este análisis permite no solo contextualizar el estado del arte, sino también justificar la pertinencia del enfoque temático, identificar actores clave en el área y orientar futuras líneas de investigación aplicada, particularmente hacia técnicas emergentes, materiales de encapsulación novedosos y aplicaciones funcionales específicas (Mandal et al., 2014).

7. Marco Teórico

7.1 Encapsulación de compuestos bioactivos

Hasta hace algunos años, la alimentación del ser humano era elemental para su supervivencia; sin embargo, en la actualidad se sabe que además de la relación directa con el bienestar físico, involucra otros aspectos, por ejemplo, ideología, raza, disponibilidad, estado de ánimo, placer y nutrición (Yorde, 2014). De tal manera que, las personas buscan satisfacer la mayoría de las necesidades físicas, fisiológicas y psicológicas por medio de los alimentos. Por esto, la industria alimentaria busca ofrecer alimentos que además de ser productos agradables en consistencia, sabor y olor, sean de fácil preparación, contengan ingredientes naturales, aporte calórico y beneficios para la salud de los consumidores (Alzate Yepes, 2019). Por ejemplo, se han desarrollado alimentos funcionales con nutrientes y compuestos bioactivos provenientes de fuentes naturales, que incrementan los beneficios del producto (Silveira Rodríguez et al., 2003). Los compuestos bioactivos son metabolitos secundarios como, ácidos fenólicos, flavonoides, carotenoides, vitaminas, ácidos grasos, aceites esenciales y probióticos (Kamiloglu et al., 2019), que se encuentran en alimentos naturales como vegetales, granos, frutas, tubérculos y microorganismos (Santos et al., 2019) y presentan actividad biológica (p. ej., actividad antioxidante y antiinflamatoria). La encapsulación se ha consolidado como una técnica eficaz para preservar compuestos bioactivos, ya que los resguarda frente a condiciones ambientales y fisiológicas adversas, y permite su liberación de forma controlada en el cuerpo. (Castromonte et al., 2020). La encapsulación puede realizarse por diferentes procesos, entre los más conocidos están la liofilización y el secado por aspersión (Nedovi et al., 2011; Đorđević et al., 2015).

7.2 Definición y principio activo de la encapsulación

La encapsulación es una técnica empleada para proteger partículas, sustancias o compuestos; que se degradan fácilmente, se oxidan o pierden su actividad ante condiciones ambientales (Castromonte et al., 2020). La finalidad de la encapsulación es proteger, estabilizar y retrasar la degradación en compuestos de interés, por ejemplo, compuestos bioactivos, que naturalmente tienen una fácil modificación estructural debido a la luz, la temperatura y el calor (Nedovic et al., 2011). La encapsulación se puede llevar a cabo con diversos encapsulantes (llamados materiales pared), equipos y metodologías, para

generar cápsulas en tamaño nano (10 a 1000 nm) o micro (3 a 5000 μm) (Sultana et al., 2000; Borgogna et al., 2010). La técnica de encapsulación permite proteger el principio activo de su degradación (oxidación, hidrólisis), controlar su liberación en un cierto tiempo o en un punto determinado y enmascarar el olor o sabor del compuesto principal. Una técnica de encapsulación muy empleada es mediante emulsificación. Una emulsión se define como un sistema heterogéneo, consistente en al menos un líquido, denominado fase interna o discontinua, disperso en forma de gotas en otro, conocido como fase externa o continua, inmiscible con el primero (Becher, 1965). Las emulsiones, aunque termodinámicamente inestables, pueden presentar cierta estabilidad en el tiempo, dependiendo de sus componentes (Hemar et al., 2010). Para lograr la estabilidad de las gotas de fase dispersa en la fase continua, evitando su coalescencia, se utilizan agentes estabilizantes o emulsionantes, que se sitúan en la interfase entre la superficie de las gotas y la fase continua (Zhang et al., 2018). La selección del estabilizante depende de, la aplicación del producto en emulsión obtenido, como de la técnica seguida para su preparación. Los estabilizantes más frecuentes son los tensioactivos, aunque también hay emulsiones estabilizadas por sólidos o proteínas (Pimentel et al., 2009). las emulsiones se utilizan en industrias muy diversas, entre las que destacan la alimentaria, farmacéutica, cosmética y metalúrgica; en esta última principalmente como fluidos de mecanizado con características lubricantes y refrigerantes (Jiménez-colmenero, 2013). los productos en emulsión son muy frecuentes y pueden utilizarse para encapsular compuestos con propiedades beneficiosas para la salud (McClements, 2018). como ejemplos de compuestos susceptibles de encapsulación en emulsiones se encuentran: polifenoles (Hemar et al., 2010), luteína (Gutiérrez et al., 2014) o vitaminas (yang, 2013). la encapsulación permite, que estos compuestos conserven mejor sus propiedades a lo largo del tiempo y que puedan ser liberados de forma controlada. para encapsular un compuesto o principio activo, se requiere su disolución en la que será la fase interna, que posteriormente se dispersa en la fase externa (cruz, 2023). dependiendo de la naturaleza del compuesto de interés se encapsulará en la fase acuosa (w) o aceitosa (o) en alguno de los diferentes tipos de emulsiones: simples (o/w), dobles (w/o/w), múltiples (m-o/w), con partículas sólidas (spl-o/w), proteínas, etc.

7.3 En qué consisten las tecnologías de micro y nanoencapsulación

Las tecnologías empleadas para la microencapsulación y nanoencapsulación de péptidos permiten proteger sus propiedades bioactivas y controlar su liberación en matrices alimentarias (Aguilar-Toalá et al., 2022). En la microencapsulación, el secado por aspersión consiste en atomizar una emulsión o suspensión que contiene el péptido y el material de pared dentro de una corriente de aire caliente, produciendo microcápsulas sólidas tras la evaporación del solvente (Li et al., 2023). Por otro lado, la liofilización implica la congelación de la mezcla seguida de la eliminación del agua por sublimación bajo vacío, obteniéndose partículas secas con alta estabilidad térmica y estructural (Kamble et al., 2025). En cuanto a la nanoencapsulación, la nanoprecipitación se basa en la formación de nanopartículas mediante la difusión de un solvente orgánico con polímero en una fase acuosa, provocando la precipitación controlada del material de pared alrededor del péptido (Aguilar-Toalá et al., 2022). Finalmente, la nanoemulsificación utiliza fuerzas mecánicas o ultrasonido, junto con agentes

tensoactivos, para generar gotas nanométricas estables que encapsulan los péptidos y facilitan su incorporación en alimentos funcionales (Kamble et al., 2025).

7.4 Péptidos bioactivos

Los péptidos bioactivos han sido definidos como fragmentos específicos de proteínas, de origen animal o vegetal, que tienen un impacto positivo en las funciones o condiciones corporales y que pueden influir definitivamente en la salud humana, más allá de una nutrición normal y adecuada. Dependiendo de la secuencia de aminoácidos del péptido, su administración oral podría afectar algunos de los principales sistemas del organismo: cardiovascular, nervioso, gastrointestinal e inmunológico (Hartmann & Meisel, 2007; Korhonen & Pihlanto, 2006). Es decir, la actividad biológica está relacionada con la composición y secuencia de los aminoácidos que los componen (Torrez-Llanez, et al., 2005). Según un informe de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, la investigación sobre componentes bioactivos logrando una liberación controlada en el intestino, como se muestra en la figura 10, constituye un área focal clave en futuras investigaciones para mejorar la salud humana a través de la nutrición (Awulachew, 2021). Una creciente preocupación por parte de los consumidores respecto a los posibles efectos negativos de ciertos ingredientes químicos sintéticos, lo que ha generado un aumento en la preferencia por compuestos de origen natural (Haque & Chand, 2007). La mayoría de los péptidos bioactivos descritos hasta ahora tienen propiedades estructurales en común, como cadenas cortas de aminoácidos (de 2 a 9 aminoácidos), residuos de aminoácidos hidrófobos además de grupos prolina, lisina o arginina y resistencia a la acción de los agentes digestivos o peptidasas (Kitts & Weiler, 2006). Este último permite su absorción y paso al torrente sanguíneo, sin alteración.

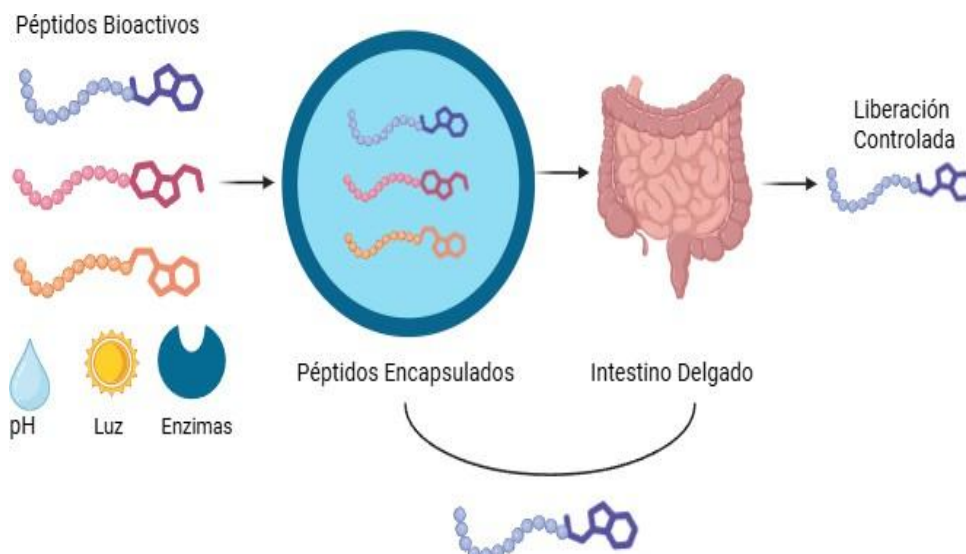


Figura 10.
Fuente: Elaboración propia
Año: 2025

7.4 Biodisponibilidad

Al recomendar el consumo de algún alimento con una elevada concentración de antioxidantes es importante evaluar la real proporción de antioxidantes que llegarán a la circulación sistémica y podrán tener su efecto protector, es decir, su biodisponibilidad (Schonfeldt et al., 2016). El concepto de biodisponibilidad puede ser definido de diferentes formas. Una de las definiciones más aceptadas se refiere a la fracción de un nutriente, que, tras ser ingerido, logra ser absorbido y transformado por el cuerpo de manera efectiva para ejercer su función (D'Archivio et al., 2007). Es por esto, que, en polifenoles y flavonoides, no siempre son los más activos en el organismo, ya sea porque tienen una menor actividad intrínseca, su absorción en el intestino es baja, son altamente metabolizados o se excretan rápidamente (Quiñones et al., 2012). En consecuencia, no solo es importante saber la cantidad total del nutriente que se encuentra presente en un alimento, ingrediente alimentario o suplemento dietético, sino aún más importante es saber la cantidad que está biodisponible de éste (Day & Williamson, 2001).

7.5 Bioaccesibilidad

La bioaccesibilidad se define como la cantidad de un compuesto que se libera de los alimentos durante la digestión, quedando disponible para ser absorbido por el intestino, después de una digestión simulada y, como resultado, está disponible para su absorción por la mucosa intestinal. (Shim, et al., 2009). El término incluye transformaciones digestivas de los alimentos en materiales listos para la asimilación, la absorción o asimilación en las células del epitelio intestinal, así como el metabolismo presistémico, intestinal y hepático (Galanakis, 2016).

7.6 Bioactividad

La bioactividad describe la acción positiva que puede tener un compuesto sobre los procesos biológicos del cuerpo, generando efectos funcionales medibles. (Bhat et al., 2015). En el contexto de los alimentos funcionales, la bioactividad implica que el compuesto encapsulado o presente en el alimento tiene efectos medibles en el organismo, como el progreso de la salud como se muestra en la figura 11, a la prevención de enfermedades, o el fortalecimiento de funciones específicas del cuerpo (Baró et al., 2001).

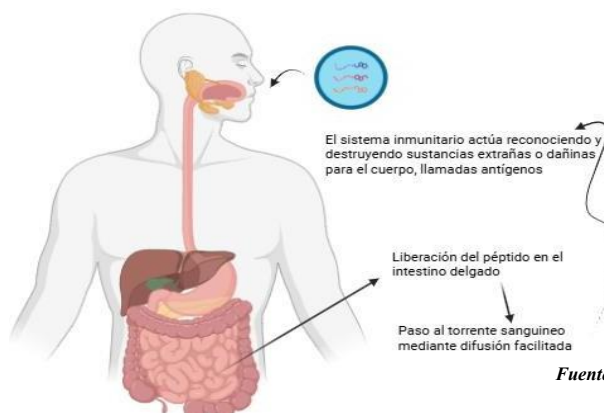


Figura 11.

Fuente: Elaboración propia, Año :2025.

8. Tipos de encapsulación

En esta monografía se abordarán dos tipos principales de técnicas de encapsulación aplicadas a péptidos bioactivos en alimentos funcionales, específicamente: Microencapsulación y nanoencapsulación.

8.1 Microencapsulación

La microencapsulación es el empaquetamiento de un material sólido, líquido o gaseoso dentro de un material de pared (Martínez-Bustos et al., 2009) el cual proporciona protección en contra de humedad, oxidación, temperatura, volatilización y reducción en la pérdida de sabores permitiendo la liberación del contenido de la microcápsula a niveles controlados bajo condiciones específicas (Parra Huerta, 2011). La estructura formada por el agente microencapsulante alrededor de la sustancia microencapsulada (núcleo) es llamada pared. Ésta protege el núcleo contra el deterioro y liberación bajo condiciones deseadas (Young et al., 1992; Madene et al., 2006). La técnica de microencapsulación ha permitido solucionar algunos problemas limitando las aplicaciones de ingredientes y aditivos alimenticios, puesto que puede controlar la eliminación de saborizantes, así como reducir volatilidad, higroscopicidad y reactividad, incrementando la estabilidad de productos bajo condiciones ambientales adversas (Favaro et al., 2010). La microencapsulación ha sido exitosamente utilizada para mejorar la sobrevivencia de microorganismos en los productos lácteos protegiendo componentes sensibles en los alimentos (Adhikari et al., 2000; Kailasapathy, 2006; Pimentel et al., 2009) y algunos factores ambientales (Weinbreck et al., 2010), por ejemplo, calor, oxígeno y humedad (Semyonov et al., 2010), asegurándolos contra la pérdida nutricional e incorporando mecanismos dentro de la formulación (Adhikari et al., 2000; Kailasapathy, 2006). Un ejemplo de lo anterior es el queso en polvo, que se puede utilizar en salsas, aliño, bizcochos, chips y directamente como saborizante en platos calientes como espaguetis y sopas; sin embargo, durante el proceso de secado es inevitable la pérdida de cierta cantidad de compuestos aromáticos (Pisecky, 2005).

8.2 Nanoencapsulación

La nanoencapsulación es un proceso novedoso derivado de la nanotecnología donde se encapsulan micropartículas en un recubrimiento. En el sector alimentario, este concepto se implementa a través de la encapsulación de microorganismos en matrices que se degradan bajo condiciones controladas, permitiendo la liberación del contenido activo en el momento más adecuado para ejercer su efecto. (Teunou & Poncelet, 2005). Teniendo en cuenta que las industrias de alimentos siempre tienen como objetivos mejorar la calidad de sus productos, alargar su vida útil y reducir costos en la producción para obtener mejores ganancias (Faridi & Jafari, 2016), esta tecnología representa una alternativa eficaz para alcanzar dichos objetivos. Su aplicación requiere comprender que existen diversos métodos de funcionamiento, los cuales varían según el tipo de cápsula utilizada. Estas diferencias responden al momento y las condiciones en que se busca su disolución en el medio, las cuales pueden depender de factores como la acidez, la temperatura o el tiempo

de exposición (Ricaurte et al., 2017). Dichas cápsulas tienen sus propias nanopartículas que se usarán según el tipo de industria. Estas tienen beneficios y también limitaciones que pueden ocasionar alteraciones en las características del producto. Por esta razón se busca encontrar los usos y aplicaciones más adecuados antes, durante y después de cualquier producción en la industria alimentaria (Guzmán, 2024). La nanoencapsulación que involucra la incorporación, absorción o dispersión, de componentes bioactivos en pequeñas vesículas con diámetro nano (o submicrón) (Bouwmeester et al., 2009). Las nanopartículas encapsuladas en la interfase de las gotas de la emulsión pueden mejorar la estabilidad del sistema y controlar el comportamiento de las gotas (Prestidge & Simovic, 2006). Además, pueden emplearse como vehículos comestibles para la liberación controlada de compuestos sabor-aroma o nutraceuticos, así como para mejorar la elasticidad de plásticos y envases destinados a alimentos en propiedades bioactivas (Sozer & Kokini, 2009).

8.3 Discusión crítica de las tecnologías de encapsulación

Las tecnologías de micro y nanoencapsulación como se observan en la figura 12, presentan ventajas diferenciadas que deben considerarse según el objetivo del alimento funcional y las propiedades del péptido bioactivo. En el caso de la microencapsulación mediante secado por aspersión, se destaca su aplicabilidad industria debido a su bajo costo, escalabilidad y facilidad de implementación. Sin embargo, la exposición a altas temperaturas puede comprometer la integridad estructural de algunos péptidos sensibles (Annan et al., 2008). Si bien la liofilización implica un costo mayor, resulta eficaz para preservar la actividad funcional de los compuestos en formulaciones particularmente delicadas, siendo una opción adecuada para alimentos en polvo o formulaciones secas (Islam et al., 2010). por otro lado, las técnicas de nanoencapsulación, como la nanoprecipitación y la nanoemulsificación, han demostrado una mejora significativa en la biodisponibilidad de los péptidos, favoreciendo su absorción en el tracto intestinal y aumentando su efectividad funcional; estas técnicas permiten generar partículas de menor tamaño, lo cual incrementa a superficie de interacción y facilita la liberación dirigida (Markets & Markets, 2012). no obstante, su aplicabilidad industrial aun enfrenta desafíos, como la necesidad de equipos especializados, costos más elevados y la falta de normativas claras sobre el uso de nanopartículas en alimentos (Sreelekshmi., et al 2023). en términos generales, no existe una técnica superior, sino que la elección depende del tipo de péptido, su sensibilidad, la matriz alimentaria y los objetivos funcionales del producto final (Lakkis, 2007). así, una evaluación integra de ventajas, limitaciones y condiciones del proceso es crucial para seleccionar la tecnología de encapsulación más adecuada.

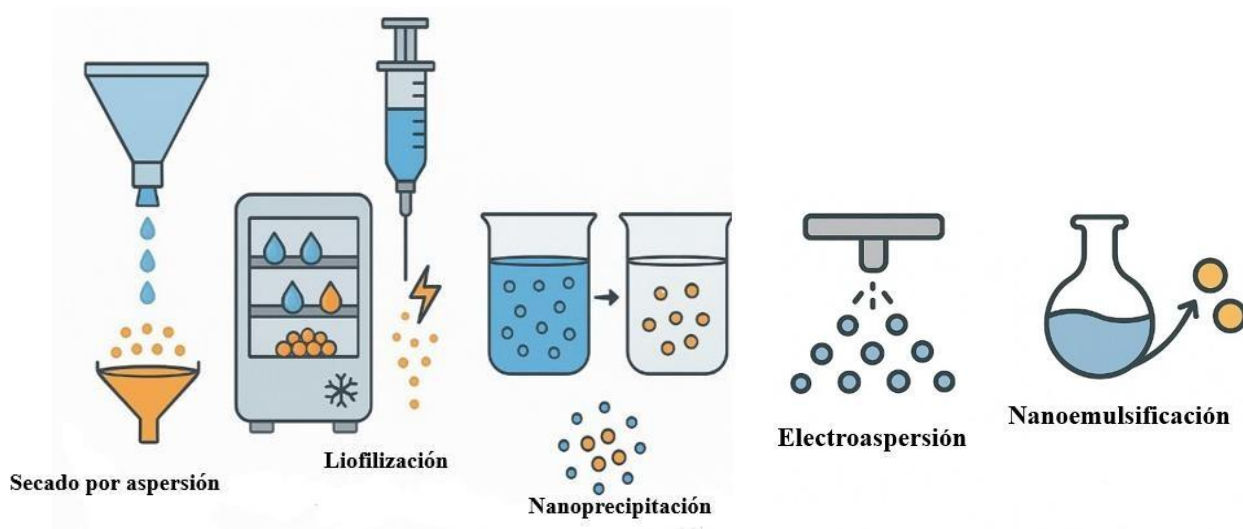


Figura 12.

Fuente: Elaboración propia

Año: 2025

9. Materiales de pared en la encapsulación de péptidos bioactivos

Los materiales de pared juegan un papel esencial en el proceso de encapsulación de péptidos bioactivos, ya que proporcionan una barrera protectora que mejora su estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad en alimentos funcionales (Choudhury et al., 2021). La elección del material adecuado depende de varios factores, como el tipo de péptido. A continuación, se describen los principales materiales de pared utilizados para la encapsulación de péptidos.

9.1 Carbohidratos

Los carbohidratos, glucosas o glúcidos, son compuestos orgánicos que contienen carbono, oxígeno e hidrógeno en diferentes combinaciones, constituyendo una parte muy importante en la alimentación humana además de generar una gran fuente de energía inmediata, ya que se desdoblan de manera muy rápida, formando grandes cadenas de glucógeno (Castro, 2014; Matix, 2014). Los carbohidratos observados en la figura 13, son ampliamente utilizados como materiales de pared debido a su disponibilidad, bajo costo, seguridad alimentaria y capacidad para formar matrices estables. En la Tabla 3 se presentan los carbohidratos más utilizados para la encapsulación de péptidos.

Tabla 3.

Carbohidrato	Definición	Uso en la encapsulación de péptidos	Características clave	Referencia
Maltodextrina	Polisacárido obtenido por hidrólisis parcial del almidón. Es soluble en agua y tiene bajo peso molecular	Amplia aplicación en secado por aspersión y liofilización como agente portador y protector de péptidos	Buena solubilidad, bajo costo, protege compuestos sensibles al calor.	(Gouin, 2004).
Goma arábica	Exudado de árboles de acacias, compuesto por polisacáridos y glicoproteínas.	Utilizada como emulsionante y estabilizante en la microencapsulación de péptidos mediante atomización	Buena estabilidad oxidativa, alta solubilidad, forma películas protectoras.	(Gharsallaoui et al., 2007).
Almidón	Polisacárido vegetal compuesto por amilosa y amilopectina. Puede ser modificado física o químicamente.	Usado en forma nativa o modificada como material de matriz en micro y nanoencapsulación.	Biodegradable, abundante, bajo costo, capacidad de hinchamiento y formación de geles.	(Liu et al., 2020).
Quitosano	Polisacárido derivado de la desacetilación de la quitina. Posee carga positiva.	Utilizado en nanoencapsulación por coacervación y nanoprecipitación para encapsular péptidos bioactivos.	Biocompatible, antimicrobiano, forma geles y nanopartículas fácilmente.	(Ribeiro et al., 2020).

*Fuente: Elaboración propia
Año: 2025*

9.2 Proteínas

Se han utilizado materiales de pared proteicos procedentes tanto de fuentes animales como vegetales. éxito para encapsular probióticos. Algunas de estas fuentes incluyen lácteos, gelatina y diversas legumbres. Las proteínas observadas en la figura 13, son materiales de pared importantes en la encapsulación de péptidos, ya que tienen la capacidad de interactuar con ellos a través de enlaces electrostáticos y formar cápsulas estables. Además, son biocompatibles y biodegradables (Bhagwat et al., 2020). Entre las proteínas más comunes presentadas en la tabla 4, se incluyen:

Tabla 4.

Proteína	Definición	Uso en la encapsulación de péptidos	Características claves	Referencia
Caseína	Fosfoproteína láctea que constituye la fracción principal de las proteínas de la leche. Se agrupa en micelas con capacidad de formar estructuras coloidales.	Utilizada para formar micelas y nanopartículas que encapsulan péptidos, mejorando su estabilidad en condiciones gastrointestinales.	Buena capacidad de emulsificación, alta estabilidad térmica, interacción con péptidos bioactivos.	(Livney, 2010).
Suero de leche	Mezcla de proteínas solubles obtenidas como subproducto de la coagulación de la leche, rica en β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina.	Usada para formar matrices y nanopartículas con alta capacidad de encapsulación y liberación sostenida de péptidos.	Alta solubilidad, buena biodisponibilidad, capacidad antioxidante y emulsificante.	(Shpigelman et al., 2010).
Gelatina	Proteína obtenida por hidrolisis parcial del colágeno animal. Forma geles termo-reversibles.	Empleada en microcápsulas y nanopartículas por coacervación para proteger péptidos y controlar su liberación.	Buena biocompatibilidad, formadora de geles, fácil de modificar químicamente.	(Gómez-Mascaraque et al., 2017).

Fuente: *Elaboración propia*
Año: 2025

9.3 Lípidos

Los lípidos, observados en la figura 13, que incluyen ácidos grasos, grasas, ceras, esteroides y fosfolípidos, son un grupo ecléctico; son un grupo de moléculas utilizadas para designar sustancias con polaridad relativamente baja y, por lo tanto, baja solubilidad en compuestos polares como el agua (Mataix & Sánchez de Medina, 2014). No hay muchos estudios que trabajen con la encapsulación de probióticos con sólo lípidos como agente encapsulante (Palou et al., 2014). Los lípidos también garantizan una liberación controlada en el intestino a través de la lipasa (Rodríguez et al., 2014). Entre los lípidos más comunes mostrados en la tabla 5, se incluyen:

Tabla 5.

Lípido	Definición	Uso en la encapsulación de péptidos	Características claves	Referencia
Triglicéridos	Moléculas formadas por una molécula de glicerol unida a tres ácidos grasos. Son componentes principales de grasas y aceites.	Utilizados en nanopartículas lipídicas sólidas y emulsiones para proteger péptidos en el entorno gastrointestinal.	Buena capacidad de carga, biocompatibles, controla liberación de compuestos lipofílicos e hidrofílicos.	(Doktorovova et al., 2014).
Lecitina	Mezcla de fosfolípidos naturales presentes en tejidos animales y vegetales, comúnmente derivada de soya o huevo.	Empleada como emulsionante y material base en liposomas y nanoemulsiones para encapsular péptidos.	Excelente emulsificador, forma estructuras vesiculares liposomas, mejora la estabilidad de péptidos.	(Mozafari et al., 2008).

Colesterol	Lípido esteroide que forma parte de las membranas celulares, aporta rigidez y estabilidad.	Componente clave en liposomas, estabiliza la bicapa fosfolipídica donde se encapsulan péptidos bioactivos.	Regula fluidez y permeabilidad de liposomas, mejora la retención y estabilidad del péptido encapsulado.	(Akbarzadeh et al., 2013).
------------	--	--	---	----------------------------

*Fuente: Elaboración propia
Año: 2025*

9.4 Polímeros sintéticos biocompatibles

Son materiales creados artificialmente que pueden interactuar con sistemas biológicos sin provocar reacciones adversas. Estos polímeros, observados en la figura 13, se diseñan para ser seguros y funcionales en aplicaciones médicas, farmacéuticas y alimentarias. Su biocompatibilidad permite su uso en encapsulación de compuestos bioactivos, liberación controlada de fármacos, alimentos funcionales, prótesis y tejidos artificiales (García Sánchez, 2012). Entre los polímeros sintéticos biodegradables más comunes mostrados en la tabla 6, se incluyen:

Tabla 6.

Polímeros sintéticos biodegradables	Definición	Uso en la encapsulación de péptidos	Características claves	Referencia
Ácido Poliláctico (PLA)	Poliéster biocompatible y biodegradable derivado del ácido láctico, obtenido de fuentes renovables como almidón de maíz.	Protege péptidos en sistemas de liberación sostenida. Usado en aplicaciones farmacéuticas y alimentos funcionales.	Biocompatible, resistente, degradación moderada, buena barrera protectora.	(Zhang et al., 2019).

10. Perspectivas futuras e innovación en encapsulación de péptidos

El campo de la encapsulación de compuestos bioactivos, en particular de péptidos funcionales, se encuentra en constante evolución. Entre las líneas más prometedoras se destacan:

- **Encapsulación basada en microfluídica**, una técnica emergente que permite un control preciso del tamaño y la composición de las cápsulas, con gran potencial para sistemas de liberación dirigida y producción a pequeña escala con alta reproducibilidad (Zhang et al., 2020).
- **Uso de materiales de pared funcionales**, como biopolímeros inteligentes que responden a estímulos específicos (pH, temperatura, enzimas digestivas) y que permiten una liberación controlada y localizada de los péptidos en el tracto gastrointestinal (Shah et al., 2022).
- **El uso de impresión tridimensional**, permite crear alimentos a medida, ajustando tanto la forma como la dosis de compuestos funcionales según el perfil del consumidor (Maged et al., 2022). Además, se espera un avance en la regulación y aceptación comercial de nanoencapsulados, lo que facilitará la incorporación de péptidos bioactivos en una nueva generación de alimentos funcionales personalizados, preventivos y terapéuticos (Li et al., 2017). Estas innovaciones abren un panorama amplio para el diseño de productos que mejoren la salud pública, especialmente en áreas como la hipertensión, la obesidad, la salud intestinal y el sistema inmune (Gajbhiye et al., 2023). A continuación, en la tabla 7, se mostrará una comparativa de las perspectivas mencionadas.

Tabla 7.

Tecnología	Descripción	Ventajas potenciales	Desafíos actuales	Referencias
Microfluídica	Producción de cápsulas mediante canales microescala para mayor control de tamaño y forma	Alta precisión, baja variabilidad y diseño personalizado.	Requiere equipos costosos y conocimientos técnicos especializados	(Karnik et al., 2008).
Biopolímeros inteligentes	Materiales de pared que responden a estímulos específicos como pH, temperatura o enzimas.	Liberación dirigida, mayor eficacia terapéutica.	Limitada disponibilidad comercial y validación de alimentos.	(Yousefi et al., 2020).

Impresión 3D de alimentos funcionales	Producción de alimentos con cápsulas incorporadas según dosis o forma personalizada.	Personalización nutricional, innovación en diseño de productos.	Altos costos iniciales, poca difusión industrial.	(Godoi et al., 2016).
Liposomas funcionales	Liposomas con moléculas específicas para mejorar la estabilidad y absorción de péptidos.	Mayor biodisponibilidad, protección reforzada	Complejidad en la formulación y estabilidad a largo plazo.	(Mozafari et al., 2008).
Sistemas de liberación multicapa	Cápsulas con varias capas de materiales para una liberación prolongada secuencial.	Control del tiempo y lugar de liberación en el sistema digestivo.	Dificultad técnica en la fabricación.	(Ravichandran, 2010).

*Fuente: Elaboración propia
Año: 2025*

11. Alimentos funcionales

Alimento funcional se define como cualquier alimento en forma natural o procesada como se muestra en la figura 14, que además de sus componentes nutritivos contiene componentes adicionales que favorecen a la salud, la capacidad física y el estado mental de una persona (Arai, 1996). El calificativo de funcional se relaciona con el concepto bromatológico de "propiedad funcional", o sea la característica de un alimento, en virtud de sus componentes químicos y de los sistemas fisicoquímicos de su entorno, sin referencia a su valor nutritivo (Palou & Serra, 2000). En Europa, se define alimento funcional a "aquel que satisfactoriamente ha demostrado afectar benéficamente una o más funciones específicas en el cuerpo, más allá de los efectos nutricionales adecuados en una forma que resulta relevante para el estado de bienestar y salud o la reducción de riesgo de una enfermedad" (Roberfroid, 2000).



Figura 14.

Fuente: Elaboración propia

Año: 2025

Incorporar péptidos encapsulados en alimentos funcionales representa una estrategia prometedora para potenciar la salud y mejorar la calidad de vida del consumidor. Los péptidos bioactivos, que son fragmentos de proteínas, pueden tener efectos positivos sobre diversos aspectos de la salud, como la mejora de la función inmunológica, la regulación del metabolismo y la reducción del riesgo de enfermedades crónicas. Sin embargo, los péptidos son altamente sensibles a factores ambientales como la temperatura, la luz y el pH que puede reducir su efectividad. La encapsulación de estos péptidos, mediante tecnologías como la microencapsulación, permite protegerlos de estos factores adversos, mejorando su estabilidad y biodisponibilidad. Esto significa que los péptidos encapsulados pueden ser liberados de manera controlada en el organismo, asegurando de que lleguen a su destino de manera más efectiva. además, la encapsulación facilita la incorporación de estos compuestos bioactivos en alimentos comunes, como lácteos, bebidas o embutidos, transformándolos en productos funcionales que proporcionan beneficios adicionales para la salud. A continuación, en la tabla 8, se presenta una tabla de alimentos funcionales y la técnica utilizada para su encapsulación con péptidos bioactivos.

Tabla 8.

Producto alimenticio	Técnica de encapsulación	Función del péptido bioactivo	Resultado o beneficio	Referencias
Yogur funcional	Secado por aspersión	Antihipertensivo (inhibidor de ECA)	Reducción de presión arterial, buena estabilidad sensorial.	(Silva et al., 2021).

Pan fortificado	Liofilización	Saciantes e inmunomoduladores	Conservación de bioactividad tras cocción	(Mirmoghtadaie et al., 2022).
Bebida funcional (té)	Electroaspersión	Antioxidante	Alta eficacia en péptidos sensibles y liberación controlada.	(Andrade et al., 2021).
Bebida vegetal (de soya o almendras).	Nanoemulsificación	Antioxidante	Alta biodisponibilidad y estabilidad durante el almacenamiento.	(Fernández-Tomé et al., 2020).
Bebida láctea fermentada (kéfir o kumis).	Nanoprecipitación	Antiinflamatorio	Absorción intestinal eficiente y protección estructural.	(Udenigwe et al., 2017).

*Fuente: Elaboración propia
Año: 2025*

12. Análisis de los hallazgos generales

El análisis bibliométrico mostró un auge en la producción científica sobre el tema, con predominancia de investigaciones aplicadas a lácteos, bebidas funcionales y productos cárnicos. Se observó un interés creciente por parte de países como China y la India, así como vacíos en la exploración industria de técnicas como la electroaspersión o el uso de biopolímeros inteligentes. A partir del desarrollo de esta monografía, se identificaron diversas técnicas de encapsulación como la microencapsulación mediante secado por aspersión y liofilización, y nanoencapsulación por nanoprecipitación, electroaspersión y nanoemulsificación, que han demostrado ser efectivas en la protección de péptidos bioactivos frente a condiciones ambientales adversas. Estas tecnologías contribuyen significativamente a mejorar la estabilidad, biodisponibilidad y bioactividad de los péptidos incorporados en alimentos funcionales (Aldana et al., 2004). En relación con los materiales de pared, se evidenció que el uso de carbohidratos, proteínas lípidos y polímeros sintéticos biocompatibles influye directamente en la eficiencia de encapsulación y en la liberación controlada de los péptidos, adaptándose a distintas matrices alimentarias (Rodríguez et al., 2016). En conjunto, los hallazgos permiten concluir que, si bien existen avances importantes en la encapsulación de péptidos para alimentos funcionales, todavía hay áreas de oportunidad en términos de aplicación industrial, estandarización de procesos, y evaluación del impacto clínico de los productos desarrollados (Martin-Hernández & Cámara, 2002). Esto abre nuevas líneas de investigación para futuras aplicaciones en la industria alimentaria y en el diseño de alimentos personalizados con fines terapéuticos o preventivos. Por lo tanto, cabe destacar que las perspectivas futuras en el campo de la encapsulación apuntan al desarrollo de tecnologías emergentes como la microfluídica, los sistemas multicapa, la impresión 3D

de alimentos funcionales y el uso de materiales de pared inteligentes. Estas innovaciones representan el siguiente paso hacia la creación de alimentos funcionales más eficaces, personalizados y sostenibles, lo cual refuerza la relevancia de seguir investigando en este ámbito (Gajbhiye et al., 2023). En síntesis, si bien existe un cuerpo creciente de evidencia sobre la utilidad de la encapsulación de péptidos, persiste una brecha entre el conocimiento académico y su implementación a nivel industrial; superar este desfase requiere no sólo avanzar en el desarrollo técnico, sino también en aspectos regulatorios, económicos y de aceptación por parte del consumidor (Andrade et al., 2021). Este panorama reafirma la relevancia del presente trabajo y orienta futuras líneas de investigación y desarrollo. Por último, este análisis integral de los hallazgos refuerza la importancia de continuar explorando estas tecnologías no sólo en el ámbito académico, sino también en contextos industriales reales, tal como se abordará en la conclusión general.

13. Conclusión

El uso de técnicas de encapsulación para péptidos constituye una alternativa novedosa y efectiva para fortalecer sus propiedades funcionales dentro de los alimentos para preservar y potenciar las propiedades bioactivas de estos compuestos en el desarrollo de alimentos funcionales. A lo largo del desarrollo de este trabajo, se ha evidenciado que las tecnologías de microencapsulación y nanoencapsulación, aplicadas mediante métodos como el secado por aspersión, la liofilización, la electroaspersión, la nanoprecipitación y la nanoemulsificación, constituyen estrategias tecnológicamente avanzadas para la protección y aprovechamiento de los péptidos bioactivos en alimentos funcionales. Estas técnicas permiten preservar la integridad estructural de los péptidos y mantener su funcionalidad biológica a lo largo del procesamiento y la digestión, optimizando así, su estabilidad, biodisponibilidad y potencial efecto fisiológico en el organismo. El análisis bibliométrico realizado respalda estos hallazgos al evidenciar que la encapsulación de péptidos bioactivos es un campo de expansión, con un incremento notable de la producción científica en los últimos años. Las técnicas mencionadas han sido ampliamente investigadas, especialmente en su aplicación a alimentos funcionales. Además, la coocurrencia de términos clave y las redes de colaboración entre autores e instituciones reflejan el creciente interés científico y tecnológico por optimizar la funcionalidad de estos compuestos bioactivos. Los materiales de pared utilizados carbohidratos, proteínas, lípidos y polímeros sintéticos biocompatibles, también desempeñan un papel determinante en la eficiencia del encapsulamiento y en la liberación controlada de los péptidos. En este contexto, la monografía no sólo valida la relevancia del tema abordado desde una perspectiva científica y nutricional, sino que también permite identificar vacíos de investigación, como la escasa aplicación industrial de tecnologías emergentes como la electroaspersión, que podrían explorarse en estudios futuros. En conjunto, la encapsulación de péptidos bioactivos se consolida como una herramienta tecnológica con alto potencial para la innovación y formulación de alimentos funcionales personalizados, contribuyendo así al desarrollo de productos con valor añadido y beneficios comprobados para la salud humana.

Referencias

1. Adhikari, K., Mustapha, A., Grün, I. U., & Fernando, L. (2000). Viability of microencapsulated bifidobacteria in set yogurt during refrigerated storage. *Journal of Dairy Science*, 83(9), 1946-1951. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75070-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75070-3)
2. Aguilar-Toalá, J.E; Santiago-López, L; Pérez, C.M; Pérez, C; García, H.S; Vallejo-Cordoba, B; González-Córdova, A.F. y Hernández-Mendoza, A. (2017). Assessment of multifunctional activity of bioactive peptides derived from fermented milk by specific *Lactobacillus plantarum* strains. *Journal of Dairy Science*, 100(1): 65-75. <https://doi.org/10.3168/jds>
3. Aguilar-Toalá, J. E., Quintanar-Guerrero, D., Liceaga, A. M., & Zambrano-Zaragoza, M. L. (2022). *Encapsulation of bioactive peptides: A strategy to improve the stability, protect the nutraceutical bioactivity and support their food applications*. RSC Advances, 12(15), 9239–9257. <https://doi.org/10.1039/D1RA08590E>
4. Agyei, D; Potumarthi, R; Danquath. M.K. (2015). *Food-derived multifunctional bioactive proteins and peptides: Sources and production*. V.K. Gupta, M.G. Tuohy (Eds.), *Biotechnology of Bioactive Compounds. Sources and Applications*, Wiley Blackwell, Oxford, UK, pp. 483-506.
5. Alasalvar, C; Salvadó, J.S; Ros, E. (2020). Bioactives and health benefits of nuts and dried fruits. *Food Chemistry*, 314(1), 126192. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126192>
6. Aldana, A.S., Sandoval, E.R., Aponte, A.A. (2004). Encapsulación de Aditivos para la Industria de Alimentos. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 5, 73-83. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i2.2298>
7. Almengor, L. (2009). Nanotecnología en la industria alimentaria. *Revista Electrónica*, 13, 41-42.
8. Altaf, A. *Functional Foods and Nutraceuticals as Immunity Boosters and in Combating Lifestyle Diseases*. In: *Functional Foods and Nutraceuticals: Chemistry, Health Benefits and the Way Forward*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-59365-9_17
9. Alzate Yepes, T. (2019). Dieta saludable. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 21(1), 9-14. <https://doi.org/10.17533/udea.penh.v21n1a01>
10. Andrade, L. R., Rocha, G. A., & Silva, E. K. (2021). Electro spraying and its applications in food systems: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 311–320. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.005>.
11. Annan, T. N, Borza, A. D., & Truelstrup Hansen, L. (2008). Encapsulation in alginate-coated gelatin microspheres improves survival of the probiotic *Bifidobacterium* adolescents 15703T during exposure to simulated gastro-intestinal conditions. *Food Research International*, 41(2), 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.11.001>
12. Arai, S. (1996). Studies on functional foods in Japan—state of the art. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 60(1), 9-15. <https://doi.org/10.1271/bbb.60.9>
13. Araya, H., & Lutz, M. (2003). Alimentos funcionales y saludables. *Revista Chilena de Nutrición*, 30(1), 8-14. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182003000100001>
14. Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38(4), 902-912. <https://doi.org/10.1039/B801739P>

15. Barbosa-Cánovas, G. V., Juliano, P., & Peleg, M. (2019). Actividad del agua en los alimentos: fundamentos y aplicaciones. 1 era edición, *Journal of Food Engineering*, 246, 60-70. <https://doi.org/12.1271/bbb.60.9>.
16. Baró L, Jiménez JJ, Martínez-Férez A, Bouza Y (2001) Péptidos y proteínas lácteas bioactivas. *Magazine Ars Pharm*. 42: 135-145. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.1409>
17. Barrios Martínez, F. (2019). Estudios de encapsulación de polifenoles del té: Propiedades y estabilidad. Trabajo de grado, Universidad de Valladolid, Facultad de Medicina. Grado en Nutrición Humana y Dietética.
18. Bhat, Z. F., Kumar, S., & Bhat, H. F. (2015). Bioactive peptides of animal origin: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 5377-5392. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1731-5>
19. Borgogna, M., Bellich, B., Zorzin, L., Lapasin, R., & Cesàro, A. (2010). Food microencapsulation of bio-active compounds: Rheological and thermal characterisation of non-conventional gelling system. *Food Chemistry*, 122(2), 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.043>
20. Bouwmeester, H., Dekkers, S., Noordam, M. Y., Hagens, W. I., Bulder, A. S., De Heer, C., ... & Sips, A. J. (2009). Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 53(1), 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2008.10.008>
21. Castro Quirós M (2014). Carbohidratos y fibra: Guías alimentarias para la educación. Revista Nutricional en Costa Rica. <https://doi.org/10.15359/ree.21-3.12>.
22. Castromonte, M., Wacyk, J. & Valenzuela, C. (2020). Encapsulación de extractos antioxidantes desde subproductos agroindustriales: una revisión. Revista Chilena de Nutrición, 47(5), 836-847. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182020000500836>
23. Cruz Maya María Elena. (2023). Nanopartículas lipídicas para la encapsulación y estabilización de péptidos bioactivos de la semilla de yaca (*Artocarpus heterophyllus lam*). Tesis de química de alimentos, Universidad nacional autónoma de México, facultad de química <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000837265/3/0837265.pdf>
24. D Archivio, M., Filesi, C., Di Benedetto, R., Gargiulo, R., Giovannini, C., & Masella, R. (2007). Polyphenols, dietary sources and bioavailability. *Annali-Istituto Superiore di Sanita*, 43(4), 348.
25. Day, A. J., & Williamson, G. (2001). Biomarkers for exposure to dietary flavonoids: a review of the current evidence for identification of quercetin glycosides in plasma. *British Journal of Nutrition*, 86(S1), S105-S110.
26. Deladino, L., Anbinder, P. S., Navarro, A. S., & Martino, M. N. (2008). Encapsulation of natural antioxidants extracted from *Ilex paraguariensis*. *Carbohydrate Polymers*, 71(1), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.030>
27. Đorđević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., ... & Nedović, V. (2015). Trends in encapsulation technologies for delivery of food bioactive compounds. *Food Engineering Reviews*, 7, 452-490. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9106-7>
28. Ellessandra da Rosa Zavareze, Carlos Prentice-Hernández, Leonor Almeida de Souza-Soares. (2012). Revisión: características de las nanopartículas y sus potenciales aplicaciones en alimentos. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232012005000004>
29. F, P. Becher, (1965). Emulsions: Theory and Practice, 2.^a ed., Reinhold Publishing

- Corp., ACS Monograph Series, núm. 162, Nueva York.
30. Faridi-Esfanjani, A., & Jafari, S. M. (2016). Biopolymer nanoparticles and natural nano-carriers for nano-encapsulation of phenolic compounds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 146, 532-543. <https://doi.org/10.1016/j.colsur.2016.06.053>.
 31. Fávaro-Trindade, C. S., Santana, A. D. S., Monterrey-Quintero, E. S., Trindade, M. A., & Netto, F. M. (2010). The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate. *Book Food Hydrocolloids*, 24(4), 336-340. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.10.012>
 32. Fernández Hernández Vanessa. (2022). La Micro-nanoencapsulación en la mejora de la liberación controlada en el sistema digestivo. Tesis de posgrado; Máster Universitario en Seguridad y Calidad de los Alimentos. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/31811>
 33. Fernández, E. J., García-Barrasa, J., Laguna, A., López-de-Luzuriaga, J. M., Monge, M., & Torres, C. (2008). The preparation of highly active antimicrobial silver nanoparticles by an organometallic approach. *Nanotechnology*, 19(18), 185602. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/18/185602>
 34. Fernández-Tomé, S., Cueva, C., & Requena, T. (2020). Functional vegetable beverages with encapsulated peptides: Formulation and digestive stability. *Journal of Functional Foods*, 68, 103889. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103889>
 35. Gajbhiye, K. R., Salve, R., Narwade, M., Sheikh, A., Kesharwani, P., & Gajbhiye, V. (2023). Lipid polymer hybrid nanoparticles: a custom-tailored next-generation approach for cancer therapeutics. *Molecular Cancer*, 22(1), 160. <https://doi.org/10.1186/s12943-023-01849-0>
 36. Galanakis, CM (Ed.). (2021). *Componentes nutraceuticos y funcionales de los alimentos: Efectos de técnicas de procesamiento innovadoras*. Prensa académica, segunda edición.
 37. Gao, Y., Liu, R., & Liang, H. (2024). *Food hydrocolloids: Structure, properties, and applications*. *Foods*, 13(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/foods13071077>
 38. García Sánchez, M. (2012). *Estudio de la influencia de la concentración de nanotubos de carbono de pared simple sobre la resistencia al rayado en polimeros de polimetilmetacrilato* (Trabajo de grado). Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
 39. García-Rojas, J., Martínez-Bustos, F., & Gutiérrez-López, G. F. (2016). Application of microwave drying for microencapsulation of bioactive compounds: A review. *Food Engineering Reviews*, 8(2), 108–118. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9134-7>
 40. Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
 41. Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
 42. González-Aguilar, G. A., & García E.Á. (2015). Los alimentos funcionales. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 38, 233.
 43. Grijalva-Verdugo, C., Hernández-Martínez, M., Meza-Márquez, O. G., Gallardo-Velázquez, T., & Osorio-Revilla, G. (2018). FT-MIR spectroscopy and multivariate analysis for determination of bioactive compounds and antioxidant capacity in

- Cabernet Sauvignon wines. *CyTA-Journal of Food*, 16(1), 561-569. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1428224>
44. Guo, Y., Zhang, L., & Shang, Y. (2020). "Niobium disulfide as a new saturable absorber for an ultrafast fiber laser," *Nanoscale*, vol. 12, pp. 4537-4543, 2020. *Book Food Chemistry*, 333, 127484. <https://doi.org/10.1039/c9nr10873d>.
45. Guzmán Robayo Nicolás Mauricio (2024). Nano-encapsulación: usos y aplicaciones en la industria de alimentos. Monografía Investigativa. Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías – ECBTI. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Ingeniería de Alimentos. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/63698/Nmguzmanro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
46. Haque E, Chand R. (2006). Péptidos bioactivos derivados de proteínas de la leche. *Diario de Ciencia, Tecnología Alimentaria*. en URL: <https://www.dairyscience.info/index.php/exploitation-of-anti-microbial-proteins/111-milk-protein-derived-bioactive-peptides.html>
47. Hartmann, R., & Meisel, H. (2007). Food-derived peptides with biological activity: from research to food applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(2), 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2007.01.013>
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.025>
48. Islam, M.A., Yun, C.H., Choi, Y.J., & Cho, C.S. (2010). Microencapsulation of live probiotic bacteria. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 20(10), 1367-1377. DOI: <https://doi.org/10.4014/jmb.1003.03020>
49. Jacquier, E.F.; van de Wouw, M.; Nekrasov, E.; Contractor, N.; Kassis, A.; Marcu, D. (2024). *Local and Systemic Effects of Bioactive Food Ingredients: Is There a Role for Functional Foods to Prime the Gut for Resilience?* *Foods*, 13(5), 739. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13050739>
50. Jiménez-Colmenero, F. (2013). Potential applications of multiple emulsions in the development of healthy and functional foods. *Food Research International*, 52(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.040>
51. Kailasapathy, K. (2006). Survival of free and encapsulated probiotic bacteria and their effect on the sensory properties of yoghurt. *LWT-Food Science and Technology*, 39(10), 1221-1227. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.013>
52. Kailasapathy, K. (2009). Encapsulation technologies for functional foods and nutraceutical product development. *CABI Reviews*, (2009), 1-19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20094033>
53. Kamiloglu, S., Tomas, M., Ozdal, T., Yolci-Omeroglu, P., & Capanoglu, E. (2021). Bioactive component analysis. En C. M. Galanakis (Ed.), *Innovative food analysis* (pp. 41-65). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819493-7.00003-9>
54. Karnik, R., Gupta, A., & Majumdar, A (2008). Microfluidic platforms for controlled drug delivery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 7(3), 211-225. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrd2504>
55. Kitts, D. D., & Weiler, K. (2003). Bioactive proteins and peptides from food sources. Applications of bioprocesses used in isolation and recovery. *Current Pharmaceutical Design*, 9(16), 1309-1323. <http://dx.doi.org/10.2174/1381612033454883>
56. Lakkis, J. M. (Ed.). (2007). *Encapsulation and controlled release technologies in food systems* (pp. 1-11). Blackwell Pub. <https://doi.org/10.1002/9780470277881.ch5>

57. Li, Y., Lee, R. J., Huang, X., Li, Y., Lv, B., Wang, T., & Teng, L. (2017). Single- step microfluidic synthesis of transferrin-conjugated lipid nanoparticles for siRNA delivery. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 13(2), 371-381. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.09.014>
58. Li, M., Guo, Q., Lin, Y., Bao, H., & Miao, S. (2023). *Recent progress in microencapsulation of active peptides—Wall material, preparation, and application: A review*. *Foods*, 12(4), 896. <https://doi.org/10.3390/foods12040896>
59. Liu, S., Fen, J., Sun, N., Dong, H., Miao, L., Wang, H., ... Jiang, L. (2024). La combinación de diferentes polisacáridos iónicos y el tratamiento del pH mejoraron las propiedades funcionales de las fibrillas de amiloide de la proteína de soja mediante modificaciones estructurales. *Food Hydrocolloids*, 153, 110027. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110027>
60. Livney, Y. D. (2010). Milk proteins as vehicles for bioactives. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1-2), 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.002>
61. López, A., Deladino, L., Navarro, A., & Martino, M. (2012). Encapsulación de compuestos bioactivos con alginatos para la industria de alimentos. *@ limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 10(1), 18-27. <https://doi.org/10.24054/limentech.v10i1.1556>
62. Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release—a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
63. Maged, A., Abdelbaset, R., Mahmoud, A. A., & Elkasabgy, N. A. (2022). Merits and advances of microfluidics in the pharmaceutical field: Design technologies and prospects. *Drug Delivery*, 29(1), 1549-1570. <https://doi.org/10.1080/10717544.2022.2069878>
64. Mandal, S. M., Bharti, R., Porto, W. F., Gauri, S. S., Mandal, M., Franco, O. L., & Ghosh, A. K. (2014). Identification of multifunctional peptides from human milk. *Peptides*, 56, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2014.03.017>
65. MarketsandMarkets. (2012). *Global food encapsulation market (2012–2017): By type, functions, applications, ingredients, Shell materials, packaging and geography: Trends and forecasting*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/food-encapsulation-advanced-technologies-and-global-market-68.html>
66. Martínez-Bustos, F., Murúa-Pagola, B., & Beristain-Guevara, C. I. (2007). Aplicación del almidón de maíz ceroso fosforilado en la microencapsulación de sabores: caracterización y estabilidad. En T. P. Klening (Ed.), *Journal of Food Engineering Research Developments* (pp. 971–979). Nova Science Publishers.
67. Martín-Hernández, D.; Cámara, M. (2002). "Alimentos funcionales (nutracéuticos). Alimentos y salud, Monografía VI Coord. Sanz B. Instituto de España- Real. Academia de Farmacia pp.265-308 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S1665-1456202100010015100036&lng=en
68. Mataix Verdú, F. J., & Sánchez de Medina Contreras, F. (2009). Hidratos de carbono. En F. J. Mataix Verdú (Coord.), *Tratado de nutrición y alimentación* (Vol. 1, pp. 73–83). Ergon.

69. Matos González, M., Gutiérrez Cervelló, G., Coca Prados, J., & Pazos Medina, M. C. (2014). Preparación de emulsiones dobles agua-aceite-agua (W1/O/W2) que contienen trans-resveratrol. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 442, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.065>
70. McClements, D. J. (2018). Encapsulation, protection, and delivery of bioactive proteins and peptides using Nanoparticle and microparticle systems: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 253, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.02.002>
71. Mirmoghtadaie, L., Kadivar, M., & Shahedi, M. (2022). Encapsulation of bioactive peptides and their application in bakery products. *Food Chemistry*, 373, 131501 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.002>.
72. Mozafari, M. R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., & Demetzos, C. (2008). Liposomes: An overview of manufacturing techniques. *Cellular & Molecular Biology Letters*, 13(2), 241–253. <https://doi.org/10.4172/cmb.1000208>
73. Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1, 1806-1815. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
74. Ozkan, G., Franco, P., & De Marco, I. (2021). Valorization of plum (*Prunus domestica*) peels: microwave-assisted extraction, encapsulation and storage stability of its phenolic extract. *Journal of Food Engineering*, 294, 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110422> [Gıda Mühendisliği+Izotoplaboratuvaru fde.metu.edu.tr+1](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110422)
75. Palou, A. & Serra, F. (2000). Perspectivas europeas sobre alimentos funcionales. *Revista de Alimentación, Nutrición y Salud*, 7(3), 76-90.
76. Parra Huertas, R. A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1), 4967–4982. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v62n1.179915377021>
77. Peighambardoust, S. H., Karami, Z., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2021). A Review on Health-Promoting, Biological, and Functional Aspects of Bioactive Peptides in Food Applications. *Biomolecules*, 11(5), 631. <https://doi.org/10.3390/biom11050631>
78. Pérez Esteve, E., & Gómez Llorente, H. (2020). *Sistemas nanoestructurados basados en lípidos para la encapsulación de compuestos bioactivos* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional de la UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/146350>
79. Pimentel-González, D. J., Campos-Montiel, R. G., Lobato-Calleros, C., Pedroza-Islas, R., & Vernon-Carter, E. J. (2009). Encapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* in double emulsions formulated with sweet whey as emulsifier and survival in simulated gastrointestinal conditions. *Food Research International*, 42(2), 292-297. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.12.002>
80. Pisecky, J. (2005). Review spray drying in the cheese industry. *International Dairy Journal*, 15(6-9), 531-536. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.11.010>
81. Peighambardoust, S. H.; Karami, Z.; Pateiro, M.; Lorenzo, J. M. A (2021). *Review on Health-Promoting, Biological, and Functional Aspects of Bioactive Peptides in Food Applications*. *Biomolecules*, 11(5), 631. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11050631>
82. Prestidge, C., & S. Simovic. 2006. Nanoparticle encapsulation of emulsion droplets. *International Journal of Pharmaceutical*, 324(1), 92-100.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.06.044>
83. Pulido, A., & Beristain, C. I. (2010). Encapsulación de ácido ascórbico mediante secado por aspersión, utilizando quitosano como material de pared. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(2), 189-195.
 84. Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición hospitalaria*, 27(1), 76-89. <https://doi.org/10.3305/nh.2012.27.1.5418>
 85. Ravichandran, R. (2009). Nanoparticles in drug delivery: potential green nanobiomedicine applications. *International Journal of Green Nanotechnology: Biomedicine*, 1(2), B108-B130. <https://doi.org/10.1080/19430850903430427>
 86. Ricaurte Puentes, L., Beltrán Serna, J. D., Mondragón Serna, A., & Quintanilla Carvajal, M. X. (2017). Conferencia magistral: Nanoencapsulación y microencapsulación de aceite de palma alto oleico como nuevas tecnologías para el desarrollo del agro. *Palmas*, 38(4), 44-50. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/145212>
 87. Roberfroid, M. B. (2001). Prebiotics: preferential substrates for specific germs? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 73 (2), 406s-409s. <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.406s>
 88. Rodríguez, Y. A., Rojas, A. F., & Rodríguez, S. (2016). Encapsulación de probióticos para aplicaciones alimenticias. *Biosalud*, 15(2), 106-115. <https://doi.org/10.17151/biosa.2016.15.2.10>
 89. Sandoval-Peraza, V. M., Cu-Cañetas, T., Peraza-Mercado, G., & Acereto-Escoffié, P. O. M. (2016). *Introducción en los procesos de encapsulación de moléculas nutraceuticas*. OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.358>
 90. Santos, D. I., Saraiva, J. M., Vicente, A. A., & Moldão-Martins, M. (2019). Métodos para determinar la biodisponibilidad y la bioaccesibilidad de compuestos bioactivos y nutrientes. En F. J. Barba, J. M. A. Saraiva, G. Cravotto, & J. M. Lorenzo (Eds.), *Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds* (pp. 23-54). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00002-0>
 91. Semyonov, D., O. Ramon, Z. Kaplun, L. Brener, N. Gurevich and E. Shimoni. (2010). Microencapsulation of *Lactobacillus paracasei* by spray freeze drying. *Food Research International*, 43(1), 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.028>
 92. Shah, B. R., Zhang, C., Li, Y., & Li, B. (2016). Bioaccessibility and bioavailability of nutraceuticals encapsulated in an emulsion-based delivery system. *Trends in Food Science & Technology*, 53, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.002>
 93. Shah, S., Famta, P., Raghuvanshi, R. S., Singh, S. B., & Srivastava, S. (2022). Lipid polymer hybrid nanocarriers: Insights into synthesis aspects, characterization, release mechanisms, surface functionalization and potential implications. *Colloid and Interface Science Communications*, 46, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100570>
 94. Shahnaz, T., Fawole, A. O., Adeyanju, A. A., & Onuh, J. O. (2024). *Food Proteins as Functional Ingredients in the Management of Chronic Diseases: A Concise Review*. *Nutrients*, 16(14), 2323. <https://doi.org/10.3390/nu16142323>
 95. Shim, S. M., Ferruzzi, M. G., Kim, Y. C., Janle, E. M., & Santerre, C. R. (2009). Impact of phytochemical-rich foods on bioaccessibility of mercury from fish. *Food Chemistry*, 112(1), 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.030>

96. Shu, B., Yu, W., Zhao, Y., & Liu, X. (2020). Antioxidant and cytotoxic activities of polyphenols from the peel of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.). *Food Research International*, 137, 109598. [10.1016/j.foodres.2020.109598](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109598).
97. Silva, P., Ferreira, C., Matos, M., Barreiro, M. F., & Rodrigues, A. E. (2020). Coacervation method for encapsulation of bioactive peptides: Application to antimicrobial peptides. *Food and Bioprocess Technology*, 13(4), 593-602. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02405-w>
98. Silva, S., Borges, A., & Teixeira, P. (2021). Bioactive peptides and their use in functional yogurt development: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 74(2), 313–322. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12739>
99. Silveira Rodríguez, M. B., Monereo Megías, S., & Molina Baena, B. (2003). Alimentos funcionales y nutrición óptima: ¿Cerca o lejos? *Revista Española de Salud Pública*, 77(3), 317–331. <https://doi.org/10.1590/S1135-57272003000300009>
100. Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins—From ‘gutter-to-gold’. *International Dairy Journal*, 18(7), 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>
101. Sozer, N., & J. Kokini. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology*, 27(2), 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.10.010>
102. Sultana, K., Godward, G., Reynolds, N., Arumugaswamy, R., Peiris, P., & Kailasapathy, K. (2000). Encapsulation of probiotic bacteria with alginate-starch and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. *International Journal of Food Microbiology*, 62(1-2), 47-55. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00380-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00380-9)
103. Sreelekshmi, P. J., Devika, V., Aiswarya, L. S., Jeevan, S. R., Ramanunni, K., Nair, P. B., & Sadanandan, S. (2023). *Recent Advances in Bioactive Peptides as Functional Food for Health Promotions and Medicinal Applications. Protein and Peptide Letters*, 30(8), 626-639. <https://doi.org/10.2174/0929866530666230706104923>
104. Teunou, E., & Poncelet, D. (2005). Rotary disc atomisation for microencapsulation applications—prediction of the particle trajectories. *Journal of Food Engineering*, 71(4), 345-353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.048>
105. Torres-Llanez, M. J., Vallejo-Cordoba, B., & González-Córdova, A. F. (2005). Péptidos bioactivos derivados de las proteínas de la leche. Laboratorio de Química y Biotecnología de Productos Lácteos, Departamento de Tecnología de Alimentos de Origen Animal, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.
106. Udenigwe, C. C., & Aluko, R. E. (2017). Food protein-derived bioactive peptides: Production, processing, and potential health benefits. *Journal of Food Science*, 82(6), 1351–1358. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02455.x>
107. Vioque Javier & Millán Francisco (2006). Los péptidos bioactivos en alimentación: Nuevos agentes promotores de salud. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación.
108. Vioque, Javier; Sánchez Vioque, Raúl; Clemente, Alfonso; Pedroche, Joaquín; Yust, María del Mar; Millán, Francisco (2000). Péptidos bioactivos en proteínas de reserva. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España).
109. Weinbreck, F., I. Bodnár and M. Marco. (2010). Can encapsulation lengthen

- the shelf- life of probiotic bacteria in dry products. *International Journal of Food Microbiology*, 136(3), 364-367.
110. Xu, W., Shen, H., & Zhang, Q. (2021). Development of functional sausages containing encapsulated bioactive peptides using electrospraying technique. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 72, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102743>.
111. Y. Hemar, L. J. Cheng, C. M. Oliver, L. Sanguansri, M. Augustin. (2010). Encapsulation of oil in water emulsions containing low molecular weight surfactants and milk proteins using micro fluidization. *Food Biophysics*, 5, 120-127. <https://doi.org/10.1007/s11483-010-9152-5>.
112. Y. Yang, D. J. McClements (2013). Encapsulation of vitamin E in edible emulsions fabricated using a natural surfactant. *Food Hydrocolloids*. 30, 712-720. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.09.003>.
113. Yorde Erem, S. (2014). Cómo lograr una vida saludable. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 27(1), 129-142.
114. Young, S., Sarda, X., & Rosenberg M. (1992). Microencapsulating properties of whey proteins with carbohydrates. *Journal Dairy Science*, 76(10), 2878-2885.
115. Yousefi, M., Khorsandi, K., & Taghdisi, S. M. (2020). Smart biopolymer-based delivery systems for bioactive compounds in food. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.004>.
116. Zhang, H., Zhang, F., & Wang, X. (2021). Gelatin-based hydrogels for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 123, 111983.
117. Zhang, L., Chen, Q., Ma, Y., Sun, J. (2020). Microfluidic methods for fabrication and engineering of nanoparticle drug delivery systems. *ACS Applied Bio Materials*, 3(1), 107–20. <https://doi.org/10.1021/acsabm.9b00853>
118. Zhang, R., McClements, D. J., & Decker, E. A. (2018). Influence of emulsifier type on the oxidation and digestion of fish oil-in-water emulsions: Comparison of natural and synthetic surfactants. *Food Hydrocolloids*, 80, 287-297.
119. Zhang, X., Liu, L., Gao, X., & Zhang, H. (2019). Encapsulation of casein hydrolysate in liposomes: Physicochemical properties and stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(17), 4764-4773. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00864>
120. Zhang, Y., Ruan, D., Yang, S., & Li, Q. (2020). Effect of encapsulated bioactive peptides on the quality and shelf life of yogurt. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 6113- 6124. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17636>
121. Zhang, Y., Zhang, R., & McClements, D. J. (2015). Encapsulation of bioactive peptides using biopolymer-based delivery systems: A review. *Food Hydrocolloids*, 43, 524-536. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.022>