

TRABAJO FIN DE MÁSTER

LA MICRO-NANOENCAPSULACIÓN EN LA MEJORA DE LA CALIDAD Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

The micro-nanoencapsulation for
improving food quality and safety

FACULTAD DE FARMACIA
MÁSTER EN SEGURIDAD Y CALIDAD DE
LOS ALIMENTOS

Vanesa Fernández Hernández

Tutor: Dr. Edgar Pérez Herrero

Área de conocimiento: Farmacia y Tecnología Farmacéutica

Departamento: Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

Curso: 2021/2022 (Convocatoria de junio)

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

PALABRAS CLAVE

- 1. Introducción**
- 2. Objetivos**
- 3. Aspectos técnicos de la encapsulación en la industria alimentaria**
- 4. Aplicaciones de la micro-nanoencapsulación en la industria alimentaria**
 - 4.1. Agroquímicos**
 - 4.2. Alimentos funcionales**
 - 4.2.1. Probióticos**
 - 4.2.2. Antioxidantes y vitaminas**
 - 4.3. Envasado**

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

RESUMEN

La encapsulación es una tecnología innovadora utilizada en diferentes áreas por las ventajas que aporta. En particular, la industria alimentaria (IA) hace uso de ésta para adaptarse a los cambios sociales y medioambientales que se presentan en la actualidad. En general, las características y la estructura del sistema encapsulado dependerán de la selección del material y la técnica de encapsulación que se seleccionarán en función de las características del compuesto bioactivo de interés y su finalidad.

La encapsulación puede utilizarse en las diferentes fases de la producción de los alimentos, desde su cultivo hasta el envasado, con el fin de solucionar posibles inconvenientes tecnológicos o modificar las características del producto. En este sentido, la utilización de sistemas encapsulados para la generación de biofertilizantes y biopesticidas en la agricultura puede permitir la sustitución de los convencionales de síntesis. En la elaboración de alimentos funcionales la adición de ciertos compuestos bioactivos (CB) encapsulados supone efectos beneficiosos para la salud. En cuanto al envasado, se pueden incorporar sustancias antimicrobianas o antioxidantes encapsuladas en los mismos obteniendo envases bioactivos que mejoran la conservación de los alimentos. En todas estas etapas el uso de la encapsulación va a permitir o facilitar su desarrollo.

ABSTRACT

Encapsulation is an innovative technology used in different areas due to the advantages it provides. In particular, the food industry (FI) makes use of it to be adapted to the social and environmental changes that are currently taking place. In general, the characteristics and structure of the encapsulated system will depend on the selection of the material and the encapsulation technique, which will be selected based on the characteristics of the bioactive compound of interest and its purpose.

Encapsulation can be used in the different phases of food production, from cultivation to packaging, in order to solve possible technological problems or modify the characteristics of the product. In this sense, the use of encapsulated systems for the generation of biofertilizers and biopesticides in agriculture can allow the substitution of the conventional synthetic ones. In the production of functional foods, the addition of certain encapsulated bioactive compounds (BC) has beneficial effects on health. Regarding packaging, encapsulated antimicrobial or antioxidant substances can be incorporated, obtaining bioactive packaging that improve food preservation. In all these stages the use of the encapsulation technology will allow or facilitate its development.

PALABRAS CLAVE

«Encapsulation», «Food industry», «Bioactive», «Functional food», «Probiotics», «Packaging», «Biofertilizers», «Biopesticides».

1. INTRODUCCIÓN

La encapsulación se define como un proceso tecnológico por el cual se atrapa o envuelve una sustancia para dar lugar a sistemas encapsulados con diferentes tamaños y propiedades. Dependiendo del proceso y del tamaño final de partícula, se obtendrán sistemas en escala micrométrica (1 – 1000 μm) o nanométrica (1 – 1000 nm) y su estructura dependerá de las técnicas y materiales utilizados en su producción. La sustancia que se reviste se denomina núcleo, relleno o fase interna y el material de revestimiento será el material de pared, capa, recubrimiento o fase externa. La principal finalidad de esta tecnología es la mejora del producto ya sea en su producción, en su mantenimiento o en su uso (Arenas-Jal et al., 2020; Shishir et al., 2018).

Actualmente, la encapsulación se aplica en diferentes tipos de industrias para la obtención de distintas clases de productos. Se utiliza principalmente en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, con el fin de encapsular compuestos bioactivos para protegerlos de factores externos, mejorar su biodisponibilidad o modificar su liberación. Sin embargo, esta tecnología también es de gran utilidad en ámbitos como el cuidado personal, los productos agrícolas y químicos industriales, la biotecnología o las industrias biomédicas y de sensores (Shishir et al., 2018; Vieira et al., 2020).

El uso de la tecnología de la micro/nanoencapsulación se justifica debido a las ventajas que ofrecen los productos que se obtienen (Arenas-Jal et al., 2020; Munin & Edwards-Lévy, 2011):

- Las sustancias encapsuladas tienen mayor estabilidad que las no encapsuladas ya que el núcleo está total o parcialmente protegido frente a la exposición a factores ambientales como la luz, la temperatura, la humedad, el pH o el oxígeno, lo cual previene su degradación y alarga su vida útil,
- Permite obtener productos con una liberación controlada, liberando el componente activo en respuesta a la exposición a un factor externo como la temperatura, la presión, el pH o una enzima. Además, se puede conseguir la liberación de éste en una etapa concreta de la vida útil del producto o en un lugar específico del organismo,
- Facilita el manejo de algunas sustancias ya que puede reducir su pegajosidad, higroscopicidad o variar su punto de fusión, además se pueden obtener sustancias sólidas a partir de líquidos o gases, facilitando así su manipulación,
- Permite enmascarar y modificar sabores, olores, colores o texturas indeseables,
- Impide la interacción entre dos sustancias incompatibles que se encuentren en el mismo medio.

La generación de alimentos seguros, que no causen ningún tipo de perjuicio en el consumidor, es una manera de salvar vidas y fomentar la economía y el desarrollo de los países (Fung et al., 2018). En este sentido, el estudio y el uso de tecnologías innovadoras, como la de la encapsulación, permite obtener alimentos más seguros para el consumidor y el medio ambiente, con una mayor calidad, tanto nutricional como higiénica y organoléptica (E. V. R. Campos et al., 2019).

2. OBJETIVOS

Objetivo general: Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de la micro/nanoencapsulación en la mejora de la calidad y seguridad alimentaria.

Objetivos específicos:

- Conocer el concepto de encapsulación y justificar su utilización.
- Describir los aspectos técnicos de la tecnología de la encapsulación en la industria alimentaria.
- Estudiar el uso de la encapsulación en diferentes ámbitos de la IA orientado a mejorar la seguridad y la calidad de los alimentos.

3. ASPECTOS TÉCNICOS DE LA ENCAPSULACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Actualmente, las tendencias, preferencias y necesidades de la población están variando por factores como una mayor conciencia social de la salud y la influencia de la alimentación en ésta, o factores ambientales, como la contaminación y el cambio climático. Por ello, la IA está en continua evolución y adaptación a estos cambios, mediante la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras. Dentro de estas tecnologías, la encapsulación es una de las más prometedoras y utilizadas por su versatilidad y los beneficios que aporta (Terpou et al., 2019).

En líneas generales, como se mencionó anteriormente, la encapsulación es una estrategia común para atrapar compuestos activos en un material portador obteniendo un sistema con una o varias cualidades mejoradas (Klettenhammer et al., 2020). Al encapsular un compuesto activo es importante conocer las propiedades de éste y así seleccionar correctamente el material de encapsulación adecuado y la técnica de encapsulación óptima. Los materiales de encapsulación tienen que ser materiales para aplicación alimentaria, los denominados como *generalmente reconocidos como seguros* (Generally, Recognized as Safe, GRAS), ser compatibles con las propiedades del producto y ser biodegradables (Shishir et al., 2018; Stachowiak & Szulc, 2021). Existen muchos materiales, pero los más utilizados en la industria alimentaria son los polímeros de carbohidratos (polisacáridos), las proteínas y los lípidos (Ilustración 1) (Shishir et al., 2018).

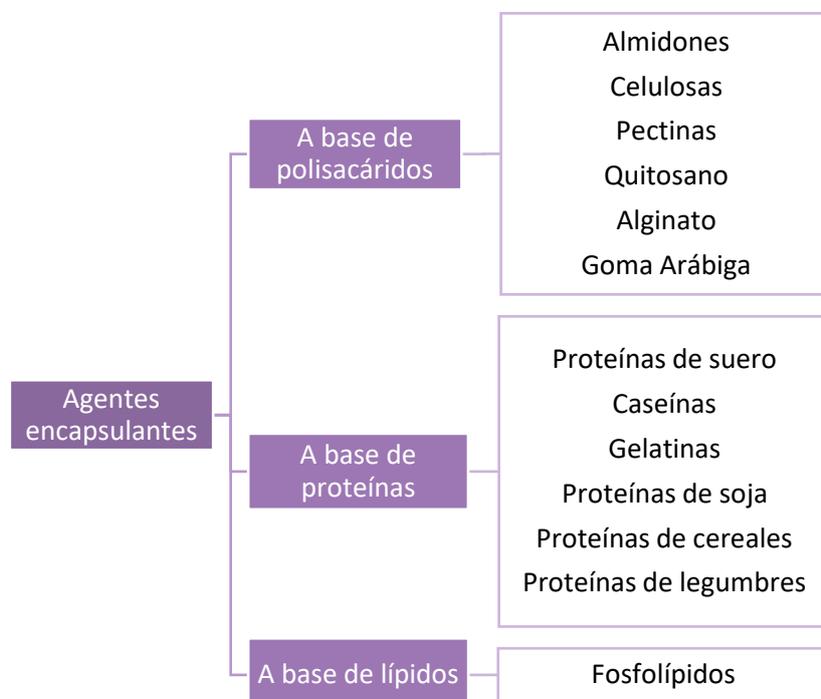


Ilustración 1. Principales materiales de encapsulación (Shishir et al., 2018).

Respecto a las técnicas para la encapsulación de compuestos activos, encontramos una gran variedad, destacando el secado por aspersion, el secado por pulverización, el recubrimiento en lecho fluido y el enfriamiento por aspersion. La mayoría se basan en formar una emulsion para solubilizar los componentes en agua o aceite y posteriormente realizar un secado. El secado por aspersion es la técnica más extendida y utilizada en la industria alimentaria, acaparando entre un 80-90% de los productos encapsulados que hay en el mercado, ya que es continua, flexible y económica. Sin embargo, no existe ninguna técnica ideal ya que todas presentan inconvenientes, lo que hace de éste un campo aún en estudio, potenciándose así el desarrollo de nuevas tecnologías de encapsulación que intenten solventar los problemas que presentan las técnicas tradicionales (Klettenhammer et al., 2020).

Dependiendo del material de encapsulación y la tecnología que se utilice, los sistemas encapsulados tendrán diferentes estructuras (Ilustración 2). En general, es posible encontrar sistemas reservorio que consisten en un núcleo rodeado de una o varias capas de encapsulante o sistemas matriciales donde la sustancia activa se distribuye dentro del encapsulante. Normalmente toman una morfología esférica, pero pueden encontrarse formas no esféricas o irregulares (Vieira et al., 2020).

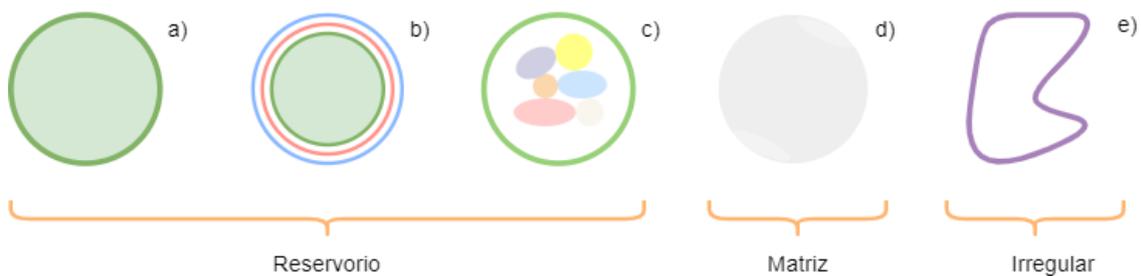


Ilustración 2. Diferentes estructuras de sistemas de encapsulación. a) Mononúcleo, b) Mononúcleo multicapa, c) Multinúcleo, d) Matriz y e) Forma irregular. Adaptada con permiso de Vieira et al., 2020.

4. APLICACIONES DE LA ENCAPSULACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Todos los procesos previos al consumo de un alimento tienen que estar diseñados para asegurar su seguridad y su calidad. La encapsulación se utiliza en la IA con este fin, aplicándose en diferentes fases de la producción de alimentos. A continuación, se expone el uso de la encapsulación en la IA desde las fases iniciales de cultivo de materias primas hasta el envasado de alimentos, pasando por uno de sus principales usos, la elaboración de alimentos funcionales.

4.1. AGROQUÍMICOS

El uso de agroquímicos en la práctica agrícola ha favorecido la producción ya que evita la aparición de plagas y favorece el crecimiento de plantas sanas. Sin embargo, su uso indiscriminado ha supuesto contaminaciones ambientales y toxicidad para animales y humanos por la presencia de residuos de agroquímicos en los alimentos, además de una disminución de su eficacia por la aparición de resistencias. También se produce degradación del suelo, encontrando suelos contaminados, con menos materia orgánica, menos biodiversidad y más salinidad. Estos factores han llevado a potenciar el uso de biofertilizantes y bioplaguicidas, y al desarrollo de técnicas que permitan una agricultura más segura (E. V. R. Campos et al., 2019).

Los biofertilizantes son formulaciones que contienen microorganismos vivos o latentes que mejoran la absorción de nutrientes por parte de la planta y su rendimiento. Utilizan microorganismos presentes en el suelo por lo que suponen una alternativa ecológica y rentable a los fertilizantes químicos. En la Ilustración 3 se muestran diferentes categorías de biofertilizantes según los microorganismos utilizados (Kumar et al., 2022).

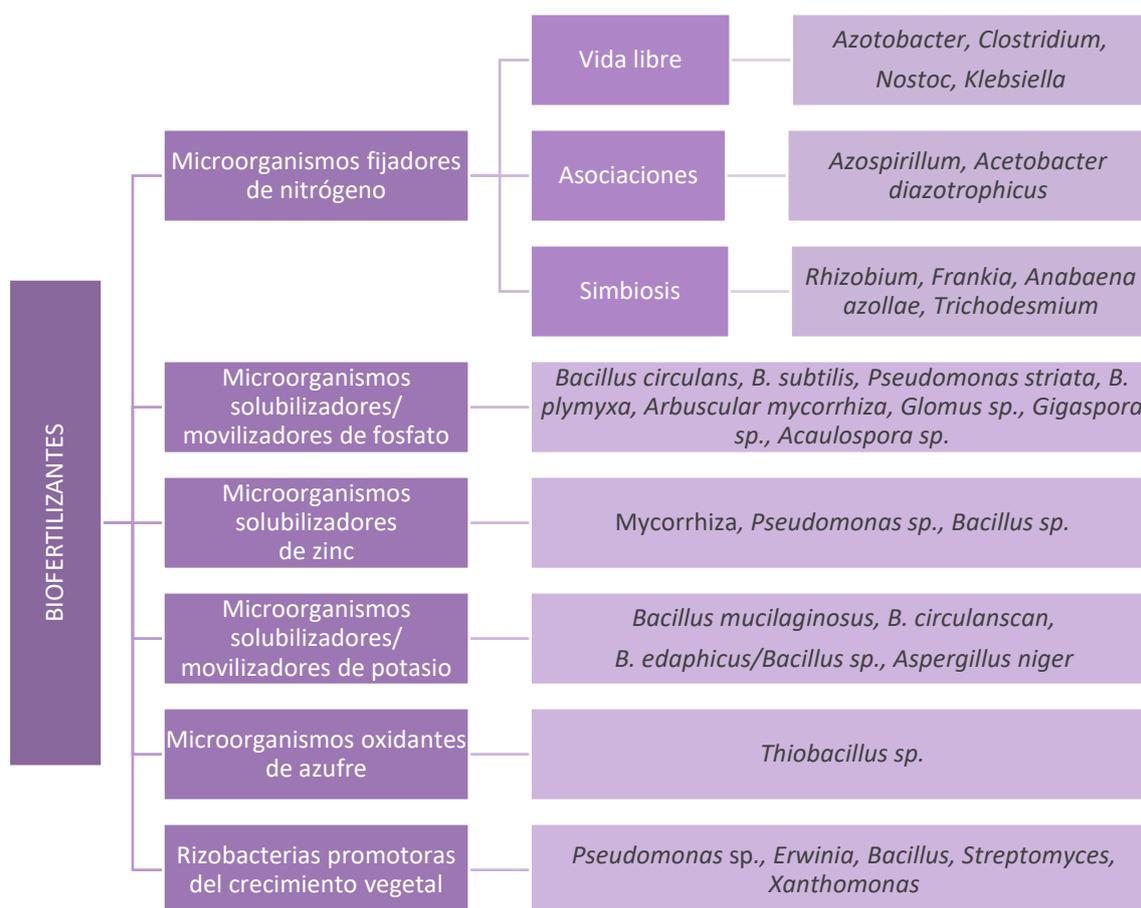


Ilustración 3. Clasificación de los biofertilizantes. Adaptada con permiso de Kumar et al., 2022.

La utilización de la tecnología de la encapsulación en la fabricación de biofertilizantes puede aumentar su viabilidad ya que va a mejorar la estabilidad y el mantenimiento de las células en el suelo. Las técnicas más utilizadas en la encapsulación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal son el secado por aspersión (Spray Drying), la emulsión y la extrusión. Con respecto a los materiales de encapsulación, los más destacados en este campo son el alginato y el quitosano, aunque el abanico es bastante amplio (Ilustración 4) (Saberri-Riseh et al., 2021).

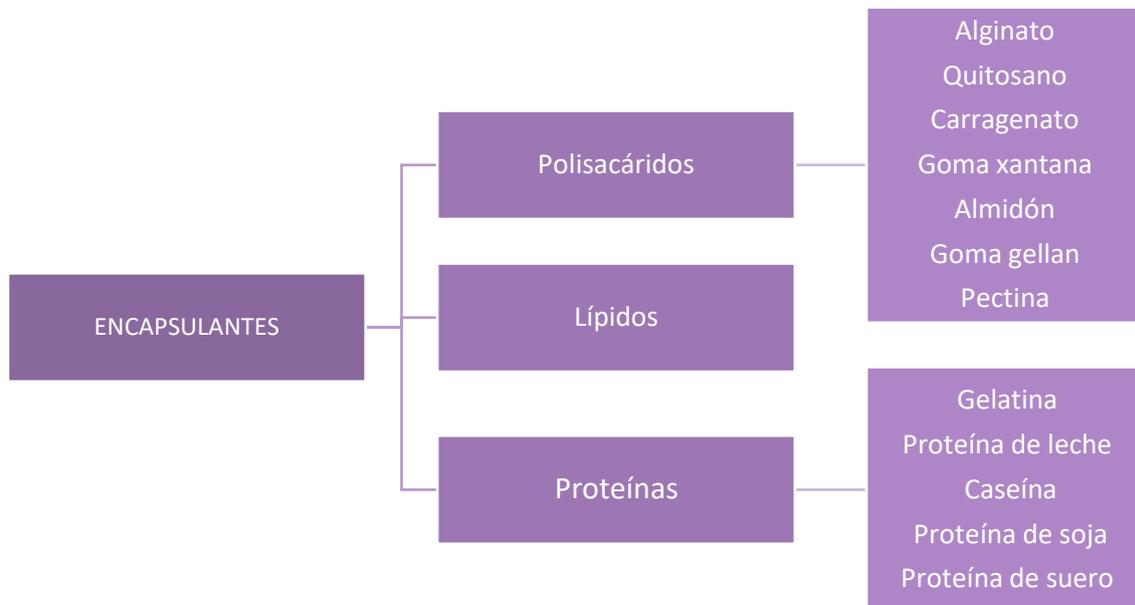


Ilustración 4. Esquema de los principales materiales utilizados para la encapsulación de biofertilizantes. Adaptada con permiso de Saberri-Riseh et al., 2021.

En un estudio realizado por Campos et al. se extrajeron microorganismos fijadores de nitrógeno de las raíces de *Lupinus luteus*, se encapsularon por secado por aspersión utilizando alginato y maltodextrina y se incorporaron a la planta. Se observó una supervivencia bacteriana muy alta de los microorganismos encapsulados, ejerciendo la encapsulación un efecto protector sobre estas (D. C. Campos et al., 2014). Liffourrena & Lucchesi, 2018 comprobaron cómo la supervivencia en suelo de *Pseudomonas putida*, promotor del crecimiento vegetal, era mayor cuando se presentaba atrapada en microperlas de alginato-perlita (Liffourrena & Lucchesi, 2018).

En cuanto a los biopesticidas, principalmente son aceites esenciales (AE) producidos por plantas que debido a su composición defienden a la planta de ataques de patógenos y herbívoros. Pueden actuar como insecticidas, fungicidas, nematocidas y bactericidas, ofreciendo ventajas frente a los pesticidas químicos ya que se descomponen rápidamente en el medio y no se acumulan en el suelo. Sin embargo, existen ciertos inconvenientes a la hora de utilizar estos biopesticidas ya que (E. V. R. Campos et al., 2019):

- Su impacto en los organismos y la actividad enzimática del suelo, en las dosis recomendadas, es menor en comparación con los pesticidas químicos,
- Existe una baja disponibilidad de biopesticidas de calidad a precios asequibles,

- Se degradan rápidamente en el medio ambiente,
- Las sustancias que componen estos biopesticidas son susceptibles a factores ambientales que pueden modificar su función.

La tecnología de la micro/nanoencapsulación es una solución para evitar estos inconvenientes y facilitar el uso de los biopesticidas. Diversos estudios han demostrado que el uso de esta tecnología mejora la estabilidad y la eficacia de los biopesticidas ya que aumenta su solubilidad, los protege de la degradación y permiten una liberación sostenida para obtener una mayor actividad residual (E. V. R. Campos et al., 2019).

Un estudio realizado por Werdin et al. sobre nanopartículas de AE de geranio y bergamota demostró que presentaban mayor toxicidad frente a la cucaracha alemana que las no encapsuladas y una alta persistencia, gracias a la liberación controlada (Werdin et al., 2015).

En este sentido Paulraj et al. compararon el poder de PONNEEM[®], un biopesticida patentado que contiene diferentes AE, con nanoformulaciones de éste con quitosano, obteniendo un mayor poder pesticida frente a *Helicoverpa armigera* utilizando las nanoformulaciones de PONNEEM[®] a concentraciones muy bajas (Gabriel Paulraj et al., 2017).

4.2. ALIMENTOS FUNCIONALES

Los alimentos funcionales son alimentos naturales o procesados enriquecidos con compuestos que poseen una actividad biológica significativa conocida, los denominados CB que, aunque no son esenciales, son capaces de producir efectos antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos, anticancerígenos y/o inmunomoduladores. Por lo tanto, estas sustancias tienen capacidad para mejorar el estado de salud y bienestar cuando se ingieren a ciertas concentraciones (Lin et al., 2021; Terpou et al., 2019; Vieira et al., 2020). La Tabla 1 muestran algunos ejemplos de CB utilizados en la industria alimentaria, junto con algunos de sus beneficios asociados (Zare et al., 2021).

Tabla 1. Principales compuestos bioactivos (CB) de interés para la industria alimentaria y sus beneficios para la salud. Adaptada con permiso de Zare et al., 2021.

Categoría	Fuente de comida	Ejemplos	Algunos beneficios de salud asociados
Probióticos	Yogur, masa madre, kimchi, chucrut, suero orgánico, pan, leche, queso	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus sp.</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Bifidobacterium</i>	Modulación de firmas microbianas de salud y enfermedad, mejora del estado inmunitario y salud intestinal
Péptidos bioactivos	Pescado, carne, leche, plantas	Péptidos en leche, huevos y sardinas	Propiedades antihipertensivas
Lípidos dietéticos	Pescado, linaza, canola, calamares, krill, algas, plantas y semillas genéticamente modificadas	Ácido alfa-linoleico, ácido docosahexaenoico, ácido eicosapentaenoico	Reducción del riesgo de aterosclerosis Mejora de la salud cardiovascular Mejora de la cognición y la salud cerebral Reducción del riesgo de ciertos tipos de cáncer
	Grasa de la leche	Ácido linolénico conjugado	Reducción del riesgo de aterosclerosis Propiedades anticancerígenas, inmunomoduladoras y antiinflamatorias
Vitaminas	Frutas, productos lácteos, verduras y carne	Vitamina A, C, D, E, K, B ₁ , B ₃ , B ₆ , B ₉ , B ₁₂	Gama de beneficios para la salud (p. ej., la vitamina A/C/E son antioxidantes, la vitamina K es esencial para la coagulación de la sangre)
Minerales	Generalmente disponible como sales	Zinc, calcio, hierro, magnesio, fósforo	Gama de beneficios para la salud (p. ej., zinc esencial para la reproducción celular)
Compuestos fenólicos y polifenoles	Vino, aceitunas, té, granadas, cacao, verduras, semilla de uva, uvas, semillas	Flavonas, flavanoles, catequinas, curcuminoides, ácidos fenólicos de resveratrol	Reducción del estrés oxidativo Protección frente a enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, metabólicas y cáncer
Carotenoides	Verduras de hoja verde, microalgas, caléndulas, zanahorias, tomates	Astaxantina, luteína, licopeno, β -caroteno	Protección contra el cáncer, enfermedades cardíacas y degeneración macular relacionada con la edad, enfermedad ocular macular relacionada con la edad y cataratas

Sin embargo, existen ciertos problemas a la hora de utilizar estos compuestos en los alimentos (Lin et al., 2021; Terpou et al., 2019; Vieira et al., 2020):

- La mayoría de los alimentos son sometidos a procesos o tratamientos que repercuten en la estructura y propiedades de los CB,
- Los CB suelen ser inestables cuando se exponen a la luz, a altas temperaturas o a diferentes factores ambientales en el procesamiento, almacenamiento o consumo,
- Los CB al deteriorarse o añadirse a los alimentos pueden proporcionar sabores u olores desagradables,
- Pueden presentarse problemas con la solubilidad en agua de los CB o por una baja biodisponibilidad de éstos.

Estos inconvenientes han llevado a la industria a desarrollar estrategias para preservar la funcionalidad de estos CB. La tecnología de la encapsulación resulta innovadora y prometedora en este aspecto ya que, al atrapar el CB en uno o más materiales de recubrimiento, éste estará más protegido en el procesamiento, almacenamiento y distribución del producto, además de poder enmascarar sabores y olores desagradables, mejorar su solubilidad y biodisponibilidad y obtener sistemas de liberación controlada (Terpou et al., 2019; Vieira et al., 2020).

A continuación, se describen algunos CB, a modo de ejemplo para visualizar las utilidades de la encapsulación en el desarrollo de alimentos funcionales.

4.2.1. *Probióticos*

La presencia de bacterias probióticas en los alimentos funcionales es muy reclamada por los numerosos beneficios que aportan al consumidor, principalmente en su microbiota intestinal. Sin embargo, la adición de éstos a matrices alimentarias puede ser una tarea compleja debido a las condiciones a las que se tienen que enfrentar las bacterias en el procesado, almacenamiento y, una vez que se ingieren, en el sistema digestivo, que pueden afectar a su viabilidad y funcionalidad. Además, su adición a alimentos puede suponer una alteración del sabor o aroma (Terpou et al., 2019).

La tecnología de la encapsulación permite solventar problemas de estabilidad dotando a las bacterias de mayor resistencia frente a las condiciones gastrointestinales y de alta termotolerancia en el procesado y almacenamiento. Además, posibilita la liberación controlada y enmascara posibles sabores o aromas que se generen (Terpou et al., 2019).

Esta área está en continua investigación ya que, aunque las técnicas de secado por aspersión o por congelación son las más utilizadas, éstas pueden comprometer la viabilidad de las bacterias por su exposición a temperaturas y presiones nocivas. En la Tabla 2 se exponen alimentos que contienen probióticos encapsulados especificando el material y el método de encapsulación (Moreno et al., 2022; Terpou et al., 2019).

Tabla 2. Aplicaciones alimentarias de bacterias probióticas encapsuladas. Adaptada con permiso de Terpou et al., 2019.

ALIMENTO	MICROORGANISMO	MATERIAL	MÉTODO
Zumo de manzana	<i>Lactobacillus rhamnosus GG</i>	Aislado de proteína de suero solo y en combinación con un almidón resistente modificado	Secado por aspersión
Zumo de zanahoria	<i>Lactobacillus casei</i>	Quitosano-Ca-alginato	Extrusión
Queso cheddar	<i>Bifidobacterium longum</i>	Na-alginato y alginato palmitoilado	Método de extrusión de gotas y método de emulsión
Salchichas secas fermentadas	<i>Lactobacillus reuteri</i>	Alginato	Extrusión
Zumo de frutas	<i>Lactobacillus paracasei</i> L26	Alginato	Extrusión
Jugos de fruta	<i>Bifidobacterium longum</i> , <i>Bifidobacterium breve</i>	Ácido poli-γ-glutámico	Secar en frío
	<i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Bifidobacterium longum</i>	Alginato o pectina recubierta de quitosano, gelatina o glucomanano	Extrusión
Helado	<i>Lactobacillus casei</i> Lc-01 y <i>Bifidobacterium lactis</i> Bb-12	Almidón resistente al alginato y al maíz	Emulsión
Bebida de yogur iraní (Doogh)	<i>Lactobacillus acidophilus</i> LA-5 y <i>Bifidobacterium lactis</i> Bb-12	Alginato	Extrusión
Queso kasar	<i>Lactobacillus acidophilus</i> LA-5 y <i>Bifidobacterium bifidum</i> BB-12	Alginato	Emulsión o extrusión
Kéfir	animales <i>bifidobacterias</i>	Alginato de sodio	Extrusión
Queso mozzarella	<i>Lactobacillus paracasei</i> ssp. <i>paracasei</i> LBC-1	Alginato	Extrusión
Queso pecorino	<i>L. acidophilus</i> , <i>B. longum</i> y <i>B. lactis</i>	Na-alginato	Extrusión
Jugo de granada	<i>Lactobacillus plantarum</i> _	Recubrimiento de perlas de alginato con doble capa de quitosano	Extrusión
Queso blanco en salmuera	<i>Bifidobacterium bifidum</i> BB-12 y <i>Lactobacillus acidophilus</i> LA-5	Alginato	Emulsión o extrusión
Yogur	<i>Lactobacillus acidophilus</i> LA-5	Pectina – Proteína de suero	Gelificación iónica y complejación.
	<i>Bifidobacterium bifidum</i> F-35	Suero/alginato	Extrusión
	<i>Lactobacillus casei</i>	Alginato de sodio (A), pectina de bajo metoxilo amidada (P) y mezclas	Extrusión
	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Alginato y quitosano	Extrusión

4.2.2. Antioxidantes y vitaminas

Los antioxidantes y las vitaminas son CBs con alto valor nutricional. Los más utilizados son las vitaminas A, C y E, los carotenoides y los compuestos fenólicos (Klettenhammer et al., 2020).

Un ejemplo de compuesto fenólico es el componente bioactivo de la cúrcuma, la curcumina. Es un aditivo alimentario con propiedades antiinflamatorias y antioxidantes que ofrece amplios beneficios para la salud y, por ello, es muy utilizado en alimentos saludables y funcionales. Sin embargo, aún es un campo en investigación ya que es poco soluble, tiene baja estabilidad y presenta bajos niveles de absorción vía oral. Para mejorar esto, se han estudiado diferentes formas de encapsulación, destacando las microemulsiones ya que mejoran su biodisponibilidad, son estables y son fáciles de formular (Amuti et al., 2021).

Por otro lado, las vitaminas, como la A o la E, aportan una larga lista de efectos favorables, pero su combinación con alimentos es compleja por su baja solubilidad en agua y su inestabilidad en el procesado y almacenamiento de alimentos. Para protegerlas se tienen que incorporar en matrices hidrofílicas, pero es necesario seleccionar una técnica de encapsulación adecuada que no afecte a su viabilidad. La encapsulación a base de nanoemulsiones está ofreciendo buenos resultados, obteniendo un polvo estable, biodisponible, con liberación controlada y que permite su conservación en el tiempo (Mujica-Álvarez et al., 2020).

La astaxantina es un costoso pigmento carotenoide utilizado en la industria del pienso. Es un antioxidante muy potente y se utiliza, ocasionalmente en alimentos y bebidas. Generalmente se utiliza astaxantina de síntesis ya que es más económica pero su síntesis da lugar a estereoisómeros que modifican su actividad y estabilidad, por lo que sólo se utiliza astaxantina natural para consumo humano. Por ello, su uso no está muy extendido ya que su coste es elevado, es inestable y poco soluble. Existen estudios que indican que su encapsulación supone una mejora en su estabilidad y solubilidad, especialmente utilizando sistemas de nanodispersión por su alta estabilidad y su fácil procesamiento. Además, la encapsulación también se puede utilizar para mejorar el uso de la astaxantina de síntesis en piensos (Stachowiak & Szulc, 2021).

4.3. ENVASADO

El envasado de alimentos es una forma directa de mantener la calidad y la seguridad de los alimentos ya que supone protección frente a factores ambientales y a la contaminación por microorganismos (Munteanu & Vasile, 2021).

La contaminación microbiana de alimentos y su deterioro supone un problema social, tanto sanitario como económico, por lo que la industria alimentaria intenta evitarlo por diferentes vías. Puesto que el 99,8% de los alimentos y bebidas se presentan envasados, la utilización de sustancias antimicrobianas en el envasado puede ser una solución (Becerril et al., 2020). Los envases que incorporan estas sustancias se conocen como

envases bioactivos (EB) y ofrecen ventajas con respecto a los convencionales ya que aumentan la vida útil del producto y la seguridad del alimento por su actividad antibacteriana y antioxidante, y evitan la adición de conservantes comestibles directamente al alimento que pueden alterar sus propiedades organolépticas o incluso resultar tóxicos (Becerril et al., 2020; Munteanu & Vasile, 2021; Song et al., 2020).

En este tipo de envases se puede recurrir a diferentes sustancias con capacidad antimicrobiana, destacando los antimicrobianos naturales que se extraen de especias y hierbas como romero, clavo, canela, orégano, tomillo, etc. presentándose la mayoría como AE (Baghi et al., 2022).

Pese a su capacidad antimicrobiana, los AE presentan alta volatilidad, baja solubilidad en agua y son sensibles a la oxidación y a las altas temperaturas, dificultando esto su utilización directa. Su encapsulación (Tabla 3) puede solventar estos problemas además de disminuir las interacciones con otros materiales, aumentar la disponibilidad del antimicrobiano y facilitar una liberación controlada o en respuesta a ciertos estímulos (Baghi et al., 2022; Becerril et al., 2020; Munteanu & Vasile, 2021).

Un estudio realizado por Amor et al. muestra cómo el aceite esencial de albahaca tiene una marcada actividad antimicrobiana. Al utilizar películas de quitosano que contienen este aceite encapsulado en el embalaje de jamón cocido, se observó que disminuía el crecimiento de bacterias aerobias mesófilas y mejoraba el pH del alimento durante su almacenamiento (Amor et al., 2021).

De la misma forma, se han estudiado los AE de especies pertenecientes al género *Citrus* y se ha concluido que sus formas encapsuladas presentan propiedades antimicrobianas mejoradas, por lo que pueden ser una alternativa económica, ecológica y natural a los conservantes sintéticos (Bora et al., 2020).

Por otro lado, la oxidación de los componentes del alimento es otro factor que favorece su deterioro, por lo que la adición de antioxidantes en EBs también tiene utilidad para mejorar la conservación de los alimentos. Actualmente, los antioxidantes naturales tienen elevado interés en esta área, pero suelen presentar problemas de inestabilidad y de interacción con otros componentes por lo que su encapsulación puede optimizar su utilización (Baghi et al., 2022).

En este sentido, Wrona et al., encapsularon té verde, un antioxidante captador de radicales libres, incorporándolo que se incorporó al envase bioactivo de carne fresca y, tras varios días, comprobaron que su evaluación sensorial era significativamente mejor que la conservada en un envase convencional (Wrona et al., 2017).

El AE de jengibre posee actividad antioxidante y antimicrobiana, por lo que su adición en EB es interesante, pero es inestable y volátil. Wang et al., estudiaron la incorporación de este AE microencapsulado y observaron un aumento considerable en su estabilidad, manteniendo concentraciones elevadas durante un tiempo prolongado (Wang et al., 2021).

Tabla 3. Ejemplos de alimentos en envases bioactivos con agentes antimicrobianos encapsulados. Adaptada con permiso de Baghi et al., 2022.

Alimento	Agentes antimicrobianos	Encapsulante	Microorganismos diana	Hallazgos principales
Queso	Aceites esenciales de dos especies: <i>Rosmarinus officinalis</i> y <i>Laurus nobilis</i>	Nanofibras de zeína	<i>Staphylococcus aureus</i> y <i>Listeria monocytogenes</i>	Ambos mostraron actividad antimicrobiana,
Carne de pollo	Liposoma de aceite de árbol de té	Quitosano	<i>Salmonella enteritidis</i> y <i>S. typhimurium</i>	Se observaron elevadas reducciones de <i>Salmonella</i> en la carne por el tratamiento con liposomas de nanofibras de quitosano, sin variaciones en las propiedades sensoriales.
Filetes de pechuga de pollo	Aceite de oliva virgen, aceite de pepita de uva y aceite esencial de ajedrea	Gelatina – Pectina	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> .	El aceite esencial de ajedrea presentó mayor actividad antimicrobiana. La mezcla de ellos mostró una actividad antimicrobiana durante 12 días de almacenamiento
Carne de cordero	Aceite de romero al 2%	Nanofibras de celulosa/Matriz de proteína de suero que contiene partículas de dióxido de titanio	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella enteritidis</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	El envase activo redujo significativamente el crecimiento microbiano y la lipólisis de la carne de cordero durante el almacenamiento.
Tomates cherry	Canela	Quitosano en la capa exterior y alginato de sodio y almidón en la capa intermedia	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Presentó altas tasas de inhibición de ambos microorganismos, además de una mayor frescura y menor tasa de pérdida de peso en dos semanas.
Pepino	Aceite de clavo	Quitosano	<i>Escherichia coli</i>	Mostró reducciones de las biopelículas de <i>E. coli</i> y mantuvo el color y el sabor del pepino durante más de 4 días.
Fresas	Tomillo	Nanofibras porosas de ácido poliláctico recubiertas con mezclas de alcohol polivinílico y polietilenglicol.	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Las fresas envasadas con esta película exhibieron una mejor frescura y más del 99% de actividad antimicrobiana contra estas bacterias.

CONCLUSIONES

- La IA está recurriendo a tecnologías innovadoras para adaptarse a las nuevas necesidades de la sociedad y del medioambiente.
- La encapsulación permite mejorar las características tecnológicas, nutritivas y de conservación de alimentos, apostando por un mayor respeto por el medio ambiente.
- La encapsulación intenta solventar inconvenientes que puedan surgir al incorporar sustancias a un alimento en cualquier punto de su vida útil con el fin de mejorar su seguridad y su calidad.
- Es fundamental la óptima selección del material y la técnica de encapsulación para obtener el resultado esperado.
- Es necesario continuar la investigación en nuevas tecnologías y materiales de encapsulación que solventen las carencias actuales de las existentes y poder ampliar su uso en esta industria.

REFERENCIAS

- Amor, G., Sabbah, M., Caputo, L., Idbella, M., de Feo, V., Porta, R., Fechtali, T., & Mauriello, G. (2021). Basil Essential Oil: Composition, Antimicrobial Properties, and Microencapsulation to Produce Active Chitosan Films for Food Packaging. *Food*, *10*(1), 121. <https://doi.org/10.3390/foods10>
- Amuti, A., Wang, X., Zan, M., Lv, S., & Wang, Z. (2021). Formulation and characterization of curcumin-loaded microemulsions: Evaluation of antioxidant stability and in vitro release. *Journal of Molecular Liquids*, *336*, 116881. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116881>
- Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J. M., & García-Montoya, E. (2020). An overview of microencapsulation in the food industry: opportunities, challenges, and innovations. *European Food Research and Technology*, *246*(7), 1371–1382. <https://doi.org/10.1007/S00217-020-03496-X>
- Baghi, F., Gharsallaoui, A., Dumas, E., & Ghnimi, S. (2022). Advancements in Biodegradable Active Films for Food Packaging: Effects of Nano/Microcapsule Incorporation. *Foods*, *11*(5), 760. <https://doi.org/10.3390/foods11050760>
- Becerril, R., Nerín, C., & Silva, F. (2020). Encapsulation systems for antimicrobial food packaging components: An update. *Molecules*, *25*(5), 1134. <https://doi.org/10.3390/molecules25051134>
- Bora, H., Kamle, M., Mahato, D. K., Tiwari, P., & Kumar, P. (2020). Citrus essential oils (CEOs) and their applications in food: An overview. *Plants*, *9*(3), 357. <https://doi.org/10.3390/plants9030357>
- Campos, D. C., Acevedo, F., Morales, E., Aravena, J., Amiard, V., Jorquera, M., Inostroza, N., & Rubilar, M. (2014). Microencapsulation by spray drying of nitrogen-fixing bacteria associated with lupin nodules. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *30*(9), 2371–2378. <https://doi.org/10.1007/s11274-014-1662-8>
- Campos, E. V. R., Proença, P. L. F., Oliveira, J. L., Bakshi, M., Abhilash, P. C., & Fraceto, L. F. (2019). Use of botanical insecticides for sustainable agriculture: Future perspectives. *Ecological Indicators*, *105*, 483–495. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.04.038>
- Fung, F., Wang, H. S., & Menon, S. (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical Journal*, *41*(2), 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.03.003>
- Gabriel Paulraj, M., Ignacimuthu, S., Gandhi, M. R., Shajahan, A., Ganesan, P., Packiam, S. M., & Al-Dhabi, N. A. (2017). Comparative studies of tripolyphosphate and glutaraldehyde cross-linked chitosan-botanical pesticide nanoparticles and their agricultural applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *104*, 1813–1819. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.06.043>

- Klettenhammer, S., Ferrentino, G., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2020). Novel Technologies Based on Supercritical Fluids for the Encapsulation of Food Grade Bioactive Compounds. *Foods*, 9(10), 1395. <https://doi.org/10.3390/foods9101395>
- Kumar, S., Diksha, Sindhu, S. S., & Kumar, R. (2022). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100094>
- Liffourrena, A. S., & Lucchesi, G. I. (2018). Alginate-perlite encapsulated *Pseudomonas putida* A (ATCC 12633) cells: Preparation, characterization and potential use as plant inoculants. *Journal of Biotechnology*, 278, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.04.019>
- Lin, T., Meletharayil, G., Kapoor, R., & Abbaspourrad, A. (2021). Bioactives in bovine milk: Chemistry, technology, and applications. *Nutrition Reviews*, 79(Suppl 2), 48–69. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab099>
- Moreno, J. S., Dima, P., Chronakis, I. S., & Mendes, A. C. (2022). Electrospayed ethyl cellulose core-shell microcapsules for the encapsulation of probiotics. *Pharmaceutics*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010007>
- Mujica-Álvarez, J., Gil-Castell, O., Barra, P. A., Ribes-Greus, A., Bustos, R., Faccini, M., & Matiacevich, S. (2020). Encapsulation of Vitamins A and e as spray-dried additives for the feed industry. *Molecules*, 25(6), 1357. <https://doi.org/10.3390/molecules25061357>
- Munin, A., & Edwards-Lévy, F. (2011). Encapsulation of natural polyphenolic compounds; a review. *Pharmaceutics*, 3(4), 793–829. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics3040793>
- Munteanu, B. S., & Vasile, C. (2021). Encapsulation of natural bioactive compounds by electrospinning—applications in food storage and safety. *Polymers*, 13(21), 3771. <https://doi.org/10.3390/polym13213771>
- Saberi-Riseh, R., Moradi-Pour, M., Mohammadinejad, R., & Thakur, V. K. (2021). Biopolymers for biological control of plant pathogens: Advances in microencapsulation of beneficial microorganisms. *Polymers*, 13(12), 1938. <https://doi.org/10.3390/polym13121938>
- Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X., & Chen, W. (2018). Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends in Food Science and Technology*, 78, 34–60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.018>
- Song, X. C., Canellas, E., Wrona, M., Becerril, R., & Nerin, C. (2020). Comparison of two antioxidant packaging based on rosemary oleoresin and green tea extract coated on polyethylene terephthalate for extending the shelf life of minced pork meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100588>

- Stachowiak, B., & Szulc, P. (2021). Astaxanthin for the food industry. *Molecules*, 26(9), 2666. <https://doi.org/10.3390/molecules26092666>
- Terpou, A., Papadaki, A., Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Bosnea, L. A., & Kopsahelis, N. (2019). Probiotics in Food Systems: Significance and Emerging Strategies Towards Improved Viability and Delivery of Enhanced Beneficial Value. *Nutrients*, 11(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/nu11071591>
- Vieira, M. v., Pastrana, L. M., & Fuciños, P. (2020). Microalgae Encapsulation Systems for Food, Pharmaceutical and Cosmetics Applications. *Marine Drugs*, 18(12), 644. <https://doi.org/10.3390/md18120644>
- Wang, H., Li, M., Dong, Z., Zhang, T., & Yu, Q. (2021). Preparation and characterization of ginger essential oil microcapsule composite films. *Foods*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/foods10102268>
- Werdin, J. O., Stefanazzi, N., Murray, A. P., Ferrero, A. A., & Fernández, B. (2015). Novel nanoinsecticides based on essential oils to control the German cockroach. *Journal of Pest Science*, 88, 393–404. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0607-1>
- Wrona, M., Nerín, C., Alfonso, M. J., & Caballero, M. Á. (2017). Antioxidant packaging with encapsulated green tea for fresh minced meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 307–313. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2017.04.001>
- Zare, M., Dziemidowicz, K., Williams, G. R., Ramakrishna, S., & Frey, M. (2021). Encapsulation of Pharmaceutical and Nutraceutical Active Ingredients Using Electrospinning Processes. *Nanomaterials*, 11(8), 1968. <https://doi.org/10.3390/nano11081968>