

Nuevas fronteras en la microencapsulación alimentaria: materiales, tecnologías emergentes y aplicaciones funcionales

Vargas-Castro Sara Abigail^{a,b}, Ruiz-Espinosa Héctor^{a*}

^a*Facultad de Ingeniería Química. Colegio de Ingeniería en Alimentos. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur, Cd. Universitaria, Col. Sn. Manuel, Puebla, Pue. México. C.P. 72570.*

^b*Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Av. de los Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Benito Juárez, Ciudad de México. C.P. 03940 (hector.ruiz@correo.buap.mx)*

Resumen

La microencapsulación es una estrategia ampliamente utilizada en la industria alimentaria para proteger compuestos bioactivos, mejorar su estabilidad fisicoquímica, controlar su liberación y facilitar su incorporación en matrices alimentarias. Este artículo revisa los principales métodos tradicionales de microencapsulación, como las emulsiones, la coacervación compleja, el secado por aspersión y la liofilización, analizando sus fundamentos, ventajas, limitaciones y aplicaciones más comunes. Además, se presentan técnicas emergentes con alto potencial en alimentos, tales como la co-encapsulación de compuestos simbióticos, la gelificación iónica (interna y externa), las emulsiones Pickering estabilizadas por partículas sólidas, el electrohilado (electrospinning), la encapsulación asistida por impresión 3D y la co-cristalización en matrices de sacarosa. Estas tecnologías ofrecen nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia de encapsulación, la estabilidad de ingredientes sensibles y el diseño de alimentos funcionales de próxima generación. Asimismo, se discuten los desafíos actuales asociados a la investigación y desarrollo de técnicas como la co-encapsulación, incluyendo la variabilidad en la distribución de partículas, la compatibilidad entre compuestos activos y matrices, así como las barreras para su escalabilidad industrial. Esta revisión proporciona una visión integral de las tendencias actuales y futuras en microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos, subrayando su relevancia para el desarrollo de productos innovadores y funcionales en el marco de una alimentación más saludable y personalizada.

Palabras Claves: *Microencapsulación, compuestos bioactivos, alimentos funcionales, tecnologías emergentes, liberación controlada.*

Abstract

Microencapsulation is a widely used strategy in the food industry to protect bioactive compounds, improve their physicochemical stability, control their release, and facilitate their incorporation into food matrices. This article reviews the main traditional micro-encapsulation methods, such as emulsions, complex coacervation, spray drying, and freeze-drying, analyzing their fundamentals, advantages, limitations, and most common applications. Additionally, emerging techniques with high potential in food are presented, such as co-encapsulation of symbiotic compounds, ionic gelation (internal and external), Pickering emulsions stabilized by solid particles, electrospinning, 3D printing-assisted encapsulation, and co-crystallization in sucrose matrices. These technologies offer new opportunities to improve encapsulation efficiency, the stability of sensitive ingredients, and the design of next-generation functional foods. Likewise, current challenges associated with the research and development of techniques such as co-encapsulation are discussed, including variability in particle distribution, compatibility between active compounds and matrices, as well as barriers to industrial scalability. This review provides a comprehensive overview of current and future trends in microencapsulation of bioactive compounds in foods, highlighting their relevance for the development of innovative and functional products within the framework of healthier and more personalized nutrition.

Key Words: *Microencapsulation, bioactive compounds, functional foods, emerging technologies, controlled release.*

Introducción

La creciente demanda de alimentos funcionales, nutraceuticos y formulaciones más estables ha impulsado el desarrollo de tecnologías que permitan proteger y liberar compuestos bioactivos de forma controlada y eficiente. En este contexto, la microencapsulación se ha consolidado como una herramienta estratégica en la industria alimentaria, ya que permite encapsular ingredientes sensibles como vitaminas, antioxidantes, probióticos, extractos naturales y ácidos grasos esenciales dentro de una matriz polimérica que actúa como barrera protectora. Esta tecnología no solo mejora la estabilidad fisicoquímica y la biodisponibilidad de los compuestos encapsulados, sino que también posibilita su liberación dirigida en el momento y lugar deseado dentro del organismo (García et al., 2024).

Esta técnica ofrece ventajas importantes, como la facilitación del manejo, la solubilización y la liberación controlada de sustancias activas, lo que amplía significativamente su aplicación en el desarrollo y procesamiento de alimentos, además, puede enmascarar sabores u olores no deseados. Se ha utilizado con éxito en la formulación de alimentos funcionales, productos reducidos en grasa y en la mejora de propiedades sensoriales, al contribuir a mantener la textura y asegurar la calidad del sabor. Las microcápsulas pueden incorporarse en diversas matrices alimentarias, como productos cárnicos, lácteos, cereales, frutas y sus derivados, con buenos resultados en términos de estabilidad y funcionalidad. Además, su uso puede contribuir a inhibir el crecimiento microbiano, influyendo directamente en la seguridad y conservación de los alimentos (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022).

Entre las técnicas de microencapsulación más utilizadas destacan el spray-drying, la extrusión y la coacervación compleja, cada una con ventajas particulares según el tipo de compuesto, su sensibilidad y la aplicación final. En particular, la coacervación compleja, basada en la interacción electrostática entre proteínas y polisacáridos, ha ganado relevancia como un método versátil, económico y especialmente adecuado para sistemas termosensibles. Además, el uso de proteínas heterólogas y biopolímeros de origen natural ha abierto nuevas posibilidades para el diseño de sistemas de encapsulación

más funcionales, sostenibles y adaptables a distintos entornos alimentarios (García et al., 2024).

El objetivo de esta revisión es analizar y discutir las principales técnicas de microencapsulación utilizadas en la industria alimentaria para proteger y mejorar la funcionalidad de compuestos bioactivos, nutrientes y probióticos, con especial énfasis en la coacervación compleja. Se exploran las aplicaciones tecnológicas de estas técnicas en alimentos funcionales, incluyendo su papel en la extensión de la vida útil de los productos, la protección frente a condiciones adversas y la liberación dirigida de compuestos sensibles. Además, se revisan aspectos clave del diseño de sistemas de encapsulación, como la selección de materiales de pared, los mecanismos de interacción proteína-polisacárido, y las nuevas aproximaciones mediante coacervación hetero proteica. Finalmente, se abordan también las aplicaciones y consideraciones técnicas de la microencapsulación, permitiendo una visión comparativa e integral de las tecnologías disponibles.

Microencapsulación

El uso de micropartículas es una tendencia en expansión en campos como la medicina, la industria alimentaria, la electrónica y la remediación ambiental, debido a su capacidad para transportar y proteger compuestos activos. En general, las microcápsulas actúan como barreras protectoras, suelen tener un diámetro de entre 0,2 y 5000 μm y consisten en un material encapsulante o de pared que envuelve un núcleo que contiene la sustancia activa. El tamaño final de la partícula, así como la estabilidad y eficiencia de la encapsulación dependen de muchos factores, como el método de procesamiento y la naturaleza del material encapsulante. Un aspecto interesante de la aplicación de microcápsulas en alimentos es que, según el material de pared y la técnica utilizada, pueden controlar la liberación del compuesto encapsulado durante el almacenamiento o favorecer su liberación in vivo durante la digestión. Por ejemplo, las microcápsulas de carboximetilcelulosa y quitosano obtenidas por coacervación permiten una liberación gradual de carotenoides, mientras que aquellas elaboradas con quitosano y tripolifosfato de sodio liberan los carotenoides de forma más rápida (hasta un 25%), tanto en

yogur como en pan (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022).

Métodos de microencapsulación

El proceso de microencapsulación se ha desarrollado a través de numerosas técnicas, con más de 200 métodos documentados en la literatura de patentes (García et al., 2024). Entre las técnicas más utilizadas destacan el secado y el enfriamiento por aspersión, eficaces para encapsular tanto compuestos hidrofóbicos como hidrofílicos (Henrique-Gomes de Sá et al., 2025). También sobresalen otros métodos tradicionales como la formación de emulsiones, coacervación, liofilización y extrusión. La selección del método adecuado depende de factores como el presupuesto, las propiedades del material del núcleo y del recubrimiento, el tamaño deseado de las microcápsulas, la aplicación final y los mecanismos de liberación esperados (García et al., 2024). No obstante, la encapsulación está evolucionando rápidamente en el ámbito de la ciencia de los alimentos, incorporando enfoques innovadores como la impresión 3D, la microfluídica, la criomolienda, la gelificación ionotrópica, la co-encapsulación y la cocristalización. Además, se han implementado técnicas electrohidrodinámicas para generar fibras funcionales que protegen los compuestos bioactivos frente a condiciones ambientales adversas, incluso a temperatura ambiente (Bazzaz et al., 2025). A continuación, se describen algunas técnicas usadas en el proceso de microencapsulación.

Emulsiones

Este proceso consta de dos etapas: dispersión y solidificación de la pared. Inicialmente, se dispersa una fase acuosa que contiene el núcleo y el material de recubrimiento en una fase orgánica, como un aceite, formando una emulsión simple de tipo agua en aceite (A/O). Posteriormente, las gotas acuosas se gelifican o reticulan mediante enfriamiento o la adición de un agente gelificante, dando lugar a microesferas que luego se lavan en un sistema acuoso para eliminar el aceite superficial. Una limitante de este método es la posible presencia de residuos de aceite, lo cual puede restringir su

aplicación en alimentos bajos en grasa o calorías (García et al., 2024). En la Figura 1 se ilustran los distintos procesos de encapsulación por emulsiones.

Para mejorar la estabilidad y eficiencia del proceso, se han desarrollado emulsiones múltiples, como agua en aceite en agua (A/O/A) o aceite en agua en aceite (O/A/O). Estos sistemas permiten encapsular compuestos tanto hidrofílicos como hidrofóbicos, y su estructura de doble barrera (dos películas y tres fases) ofrece una protección superior del núcleo. Además, mediante el uso de materiales de pared adecuados, como combinaciones de proteínas y polisacáridos, es posible diseñar sistemas con liberación retardada y dirigida, útiles para aplicaciones específicas en alimentos funcionales o nutracéuticos. Actualmente se está explorando el uso de biopolímeros vegetales debido al cambio en las preferencias de los consumidores (Vanare et al., 2025).

Por otro lado, la microencapsulación de compuestos hidrofílicos e hidrofóbicos presenta distintos desafíos técnicos. En el caso de compuestos hidrofílicos, es común enfrentar pérdidas durante la producción debido a su difusión fuera de la matriz polimérica, lo que reduce la eficiencia de encapsulación y acelera su liberación. Para los compuestos hidrofóbicos, como vitaminas liposolubles, se requieren enfoques que mantengan la estabilidad del sistema, como el diseño de sistemas núcleo-capa o la combinación de emulsificación (O/W) y gelificación con alginato. Recientemente, las emulsiones Pickering (Figura 1) han surgido como una alternativa prometedora, al utilizar partículas sólidas naturales, como almidón, zeína, o proteínas de soya y suero, en lugar de tensioactivos convencionales, ofreciendo mayor estabilidad, biocompatibilidad y menores riesgos de toxicidad. Este tipo de emulsiones ha demostrado ser eficaz para mejorar la encapsulación de compuestos sensibles como la vitamina D, permitiendo una liberación más controlada y segura en aplicaciones alimentarias, reduciendo la toxicidad asociada al uso de surfactantes sintéticos (Candiani et al., 2023).

Artículos

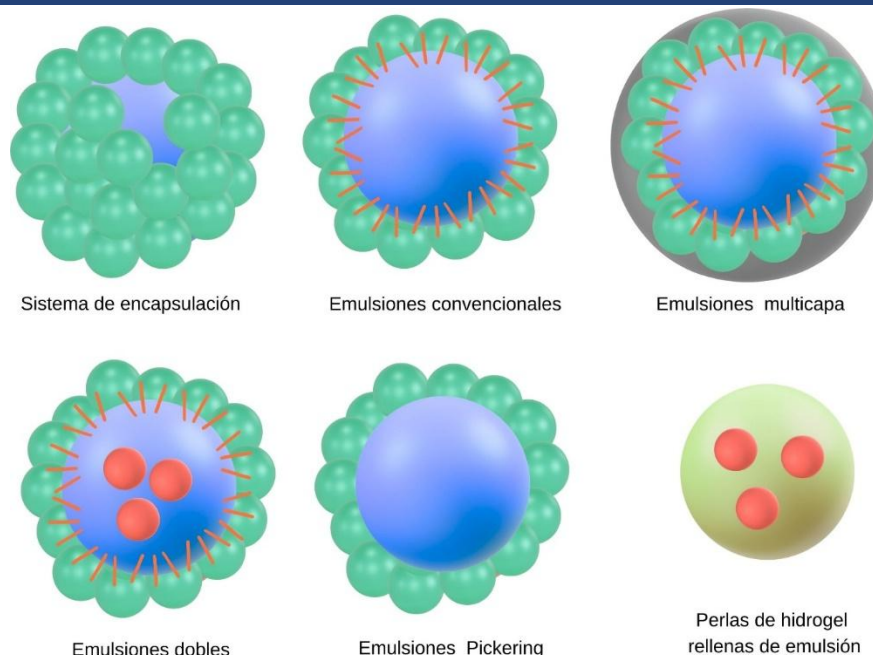


Figura 1. Sistemas de encapsulación por emulsiones

Coacervación

La coacervación es una técnica derivada de la emulsificación que consiste en mezclar una solución del compuesto bioactivo con una matriz polimérica de carga opuesta, lo que permite formar una película protectora alrededor del núcleo, es una de las primeras técnicas de microencapsulación, que se ha utilizado comercialmente desde la década de 1950. El tamaño y las propiedades de las microcápsulas obtenidas pueden ajustarse modificando parámetros como el pH, la fuerza iónica o la proporción entre núcleo y recubrimiento (García et al., 2024). Existen dos tipos de procesos de coacervación: la simple y la compleja. En la simple, interviene un solo polímero y los coacervados se forman debido a un mecanismo de deshidratación o déficit de agua causado por la adición de una sal o un agente de desolvatación al medio de reacción. Por otro lado, en los procesos de coacervación compleja (Figura 2), las interacciones iónicas entre dos o más polímeros con carga opuesta en forma acuosa, generalmente proteínas y polisacáridos, que interactúan formando un complejo insoluble que precipita alrededor del núcleo, constituyendo la microcápsula. Esta

interacción puede inducirse por cambios de pH que modifican las cargas superficiales de los polímeros o por dilución controlada que favorece su asociación (Timilsena et al., 2019).

Recientemente se han desarrollado estrategias exitosas para encapsular moléculas hidrofílicas mediante coacervación compleja, incluyendo la formación de emulsiones dobles como paso previo y la inmovilización de compuestos o probióticos en grasas vegetales de alto punto de fusión. En cuanto a los materiales poliméricos, destacan las proteínas vegetales, cuyo uso ha aumentado con el auge del flexitarianismo, así como los polisacáridos obtenidos de subproductos alimentarios, como pectinas y gomas, que representan alternativas sostenibles. La comprensión de los mecanismos de liberación es clave para evitar la pérdida prematura de compuestos bioactivos tras su incorporación en matrices alimentarias o durante la digestión *in vitro*. Aunque la escalabilidad industrial de esta técnica aún requiere mayor investigación, se han propuesto alternativas como el uso de boquillas de pulverización para mejorar su viabilidad (da Silva-Padilha et al., 2025).

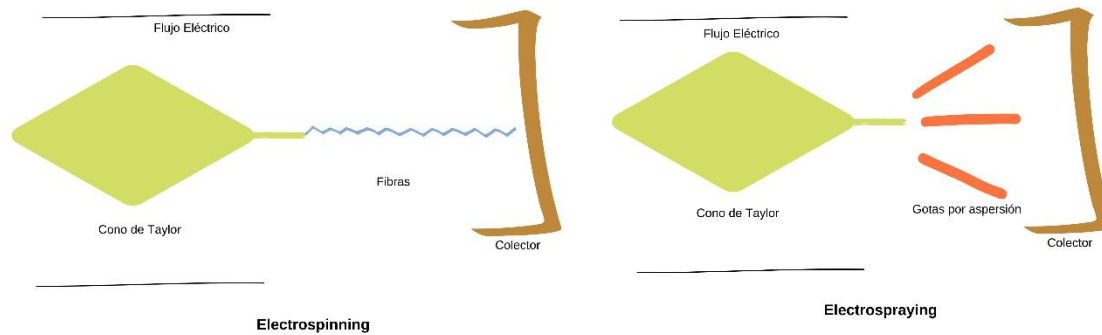


Figura 2. Sistemas de coacervación compleja

Secado por aspersión

El secado por aspersión es una de las técnicas más antiguas, económicas y ampliamente empleadas para la obtención de polvos secos a partir de soluciones, dispersiones o pastas. En la industria alimentaria, se utiliza frecuentemente para la microencapsulación de compuestos bioactivos como aceites, aromas, antioxidantes, vitaminas y enzimas, tanto hidrofóbicos como hidrofílicos. Esta tecnología ofrece ventajas como la mejora de la solubilidad y estabilidad, la protección frente a la degradación, el control en la liberación de los compuestos, y el enmascaramiento de sabores u olores no deseados (Furuta & Neoh, 2021).

El proceso consiste en dispersar el compuesto activo en una solución polimérica para formar una emulsión o suspensión, que luego se homogeneiza y atomiza en una cámara de secado, donde el agua se evapora y se forman las microcápsulas. Sin embargo, su principal limitación es la exposición a altas temperaturas, lo que puede comprometer la viabilidad de compuestos termosensibles como los probióticos. A pesar de ello, se ha demostrado que la corta duración del secado y la optimización de parámetros del proceso pueden permitir una encapsulación efectiva (García et al., 2024). Una estrategia emergente para superar sus limitaciones es la combinación con enfriamiento por aspersión, que permite obtener microcápsulas con doble recubrimiento, mejorando la protección de compuestos sensibles, la liberación controlada y la estabilidad durante el almacenamiento o procesamiento térmico (Henrique-Gomes de Sá et al., 2025)

Dado que se aplica principalmente en sistemas acuosos, los materiales de

recubrimiento deben ser solubles en agua, siendo los carbohidratos los más utilizados. Aunque favorece la encapsulación de compuestos hidrofílicos, también puede adaptarse para sustancias lipofílicas (Henrique-Gomes de Sá et al. 2025). En este sentido, la selección de los materiales de pared es muy importante, ya que sus propiedades, como la estructura molecular, la capacidad de formación de películas, la estabilidad de la emulsión y el comportamiento reológico, afectan directamente la eficiencia de encapsulación y las características del producto final (Lu et al., 2021)

Las propiedades reológicas del líquido de alimentación influyen en parámetros clave del proceso de secado por aspersión, como el tamaño de las gotas, la viscosidad, la eficiencia de atomización, el contenido de humedad, la morfología, la distribución del tamaño de partícula y la densidad aparente. Para lograr una encapsulación eficiente, la solución debe presentar una viscosidad adecuada que facilite la atomización y proteja el compuesto activo frente a la degradación. Además, los materiales de pared determinan la estabilidad, la capacidad de dispersión y el perfil de liberación del núcleo encapsulado. Por ello, su selección debe basarse en las características específicas del bioactivo, considerando su estabilidad fisicoquímica, capacidad de retención, carga, liberación controlada y propiedades sensoriales. Idealmente, estos materiales deben ser altamente solubles, poco higroscópicos, con buena capacidad emulsificante, aptos para formar películas estables, capaces de enmascarar sabores no deseados y económicamente accesibles (Lu et al., 2021).

Liofilización

La liofilización o secado por congelación es una técnica ampliamente utilizada para conservar microencapsulados, especialmente compuestos termosensibles. El proceso consta de tres etapas: congelación, secado primario (sublimación del hielo bajo vacío) y secado secundario (desorción del agua residual). Una congelación rápida favorece la formación de pequeños cristales de hielo, reduciendo el daño celular en comparación con una congelación lenta. Sin embargo, durante esta etapa pueden producirse daños químicos y osmóticos debido a la concentración de solutos en la fracción no congelada. Aunque permite preservar mejor la actividad de los compuestos sensibles, la liofilización también puede afectar negativamente la integridad de membranas, proteínas y paredes celulares, comprometiendo la viabilidad de probióticos tras el secado. Además, es un método costoso, laborioso y requiere una etapa adicional de molienda para obtener polvo. La eficiencia del proceso puede mejorarse mediante la selección de materiales de pared adecuados, la optimización de parámetros del proceso y la adición de crioprotectores como trehalosa o sacarosa, que aumentan la fracción no congelada, proporcionando mayor espacio y reduciendo el estrés osmótico y mecánico durante la formación de cristales de hielo (Misra et al., 2021).

Tanto el secado por aspersion como la liofilización son dos de las técnicas de secado más comúnmente empleadas para la microencapsulación, cada una con ventajas y limitaciones específicas. El secado por aspersion genera partículas casi esféricas de 5 a 50 μm y ofrece mejor protección frente a la oxidación, ya que el núcleo permanece encapsulado con menor exposición al ambiente. En contraste, la liofilización requiere molienda posterior para obtener un polvo fino, proceso durante el cual algunas cápsulas pueden romperse, favoreciendo la lixiviación y exposición del núcleo. Sin embargo, al operar a bajas temperaturas, la liofilización es más adecuada para compuestos termosensibles, como aceites ricos en ácido α -linolénico, probióticos o liposomas, minimizando su degradación térmica. Este método implica congelar la mezcla de núcleo y material de pared, seguida de la sublimación del hielo, lo que da como

resultado una matriz porosa, quebradiza y sin colapso estructural. Así, la elección entre ambas técnicas depende de la naturaleza del compuesto activo y de los requisitos de estabilidad y funcionalidad del producto final (Furuta & Neoh, 2021; Timilsena et al., 2019). *Técnicas emergentes con alto potencial en alimentos*

En los últimos años, han surgido nuevas técnicas de microencapsulación con un alto potencial para su aplicación en alimentos funcionales, impulsadas por la necesidad de proteger compuestos sensibles, mejorar la liberación dirigida y utilizar materiales naturales o sostenibles. Estas tecnologías emergentes, ofrecen soluciones innovadoras que complementan o superan las limitaciones de los métodos convencionales, ampliando las posibilidades en el desarrollo de productos alimentarios con valor añadido. A continuación, se describen algunas técnicas.

Co- encapsulación

La co-encapsulación es una técnica de microencapsulación en la que dos o más compuestos bioactivos simbióticos se encapsulan simultáneamente dentro de una misma cápsula o matriz polimérica. Esta estrategia permite proteger diversos nutrientes frente a condiciones adversas durante el procesamiento y almacenamiento, como temperaturas elevadas, alta humedad, presencia de oxígeno, variaciones de pH y exposición a la luz. En los últimos años, la industria alimentaria ha identificado su potencial en el desarrollo de alimentos funcionales con beneficios mejorados para la salud. Uno de sus usos más destacados ha sido el incremento en la viabilidad de probióticos, los cuales pueden combinarse con prebióticos dentro del mismo núcleo, generando efectos sinérgicos que potencian su funcionalidad (Shanuke et al., 2025).

Existen distintas técnicas para llevar a cabo la co-encapsulación, muchas de ellas también utilizadas en la encapsulación como la formación de emulsiones, la coacervación compleja junto con liofilización, el secado por aspersion, así como también gelificación iónica, externa (extrusión) e interna (Ma et al., 2025).

Gelificación iónica

La gelificación iónica es el proceso de reticulación química de polielectrolitos y agentes de reticulación, y constituye el método más básico y comúnmente utilizado para la encapsulación celular debido a su simplicidad, alta eficiencia de encapsulación y ausencia de reactivos orgánicos. Las microesferas pueden formarse mediante gelificación externa (extrusión) o interna (Figura 1) (Ma et al., 2025).

Gelificación externa o extrusión

El método de extrusión consta de tres etapas principales. Primero, se dispersa el material del núcleo en una solución que contiene el material de recubrimiento, generalmente un hidrocoloide. Luego, esta mezcla se proyecta en forma de pequeñas gotas a través de una aguja fina u otro dispositivo de goteo controlado. Finalmente, las gotas se introducen en una solución gelificante o deshidratante (por ejemplo, una solución de calcio en el caso del alginato), donde ocurre la gelificación externa o reticulación del polímero, formando microcápsulas sólidas. Esta técnica se ha aplicado principalmente a la encapsulación de probióticos, aunque también se utiliza para sabores, enzimas y proteínas. Durante el proceso, el agente reticulante penetra desde el exterior hacia la solución de polielectrolitos, promoviendo la formación de la cápsula. El tamaño final de las microesferas está influenciado por factores como la viscosidad, el caudal y la concentración de la solución polimérica, así como por su temperatura, el diámetro del orificio de extrusión y la altura o distancia entre el orificio y la solución reticulante (García et al., 2024; Ma et al., 2025; Misra et al., 2021). Si bien este procedimiento es especialmente eficaz para encapsular compuestos termosensibles o inestables frente a disolventes agresivos, y puede realizarse bajo condiciones anaeróbicas, presenta limitaciones como la dificultad para producir microcápsulas menores a 500 µm, la necesidad de boquillas de gran diámetro y la baja velocidad de producción, lo que complica su escalado. Para superar estos inconvenientes, se han desarrollado diversas variantes tecnológicas. Por ejemplo, el granulado forma gotas en condiciones ambientales controladas mediante vibración o pulsación de la boquilla. La extrusión de flujo coaxial o electrostática utiliza un campo

eléctrico para interrumpir el chorro en la punta de la aguja, generando una corriente de gotas cargadas cuyo tamaño puede ajustarse modificando el potencial eléctrico, y evitando el uso de disolventes orgánicos. La extrusión centrífuga, basada en el principio de coextrusión, emplea boquillas concéntricas en la periferia de un cilindro giratorio. Otros métodos avanzados incluyen sistemas de múltiples boquillas, el uso de energía acústica o vibratoria, la atomización por disco giratorio y la técnica de corte por chorro de líquido, los cuales buscan mejorar la eficiencia, la uniformidad y la escalabilidad del proceso (Ma et al., 2025; Misra et al., 2021).

Gelificación interna

La fabricación de microcápsulas mediante gelificación externa es un proceso sencillo; sin embargo, presenta desventajas como la obtención de partículas de gran tamaño y alta heterogeneidad. Además, no es adecuado para la producción industrial a gran escala ni garantiza fácilmente la uniformidad entre lotes. En contraste, la gelificación interna consiste en incorporar el agente gelificante dentro de las gotitas poliméricas antes de la formación del gel, el cual se libera de forma controlada mediante acidificación. Por ejemplo, se puede emulsionar una solución de alginato que contiene una fuente de calcio en una fase oleosa, y posteriormente acidificar el sistema para liberar gradualmente los iones de calcio que inducen la gelificación. Este método resulta más eficiente, permite un mayor control sobre la morfología de las partículas y genera microcápsulas más uniformes en tamaño (Ma et al., 2025).

Emulsiones Pickering

En los últimos años, las emulsiones Pickering (Figura 1), definidas como sistemas coloidales formados por dos líquidos inmiscibles (normalmente agua y aceite), cuya estabilidad se logra mediante la adsorción de partículas sólidas en la interfase, han despertado un creciente interés debido a las importantes ventajas que ofrecen. A diferencia de las emulsiones convencionales, que requieren surfactantes, las Pickering se estabilizan mediante partículas sólidas que forman una barrera física alrededor de las gotas, evitando su coalescencia. Estas emulsiones son más estables, biocompatibles y menos citotóxicas que las emulsiones convencionales basadas en tensioactivos. Las partículas estabilizantes

pueden ser inorgánicas (como hidroxiapatita o sílice), aunque actualmente la atención se centra en emulsionantes sólidos naturales como el almidón, la zeína, la proteína de soja y la proteína de suero. La decisión de identificar una emulsión de Pickering como el mejor punto de partida en lugar de una emulsión convencional está vinculada a la necesidad de tener una formulación lo más pobre posible en compuestos sintéticos y útil para aplicaciones alimentarias (Candiani et al., 2023).

Métodos de encapsulación electrohidrodinámica

El proceso de electrospinning (electrohilado) se destaca por su flexibilidad y simplicidad, y permite la producción de fibras con alta porosidad y una excelente relación superficie-volumen. Durante el proceso, una solución polimérica se somete a un voltaje elevado, es decir se aplica un campo eléctrico externo, que induce una acumulación de cargas en su superficie. Cuando la fuerza electrostática supera la tensión superficial, se forma un chorro fino que se estira y solidifica, dando lugar a fibras que se depositan en un colector. Los materiales utilizados para formar estas fibras pueden incluir biopolímeros

(polisacáridos y proteínas de origen vegetal o animal) y polímeros biocompatibles como la policaprolactona (PCL), el alcohol polivinílico (PVA) y el óxido de polietileno (PEO), usados individualmente o en combinación, según la aplicación. Las fibras tienen tamaño submicrométrico o nanométrico, sus propiedades dependen de varios factores, como la concentración y el peso molecular del polímero, la viscosidad de la solución, el voltaje aplicado, la distancia entre la aguja y el colector, y la velocidad de flujo. Gracias a sus características físicoquímicas, biocompatibilidad y biodegradabilidad, las fibras electrohiladas tienen un gran potencial en las industrias farmacéutica, alimentaria y biomédica. En alimentos, se han empleado para encapsular compuestos como carotenoides, enzimas, péptidos, aromas, vitaminas y probióticos, sin afectar sus propiedades sensoriales y contribuyendo a su protección y conservación. Además del electrospinning también existe el electrospraying, el mecanismo es el mismo pero la diferencia radica en que el producto final son partículas esféricas o micro/nanopartículas, no se forman hilos continuos sino gotas finas que solidifican en el aire (Figura 3) (Bazzaz et al., 2025).

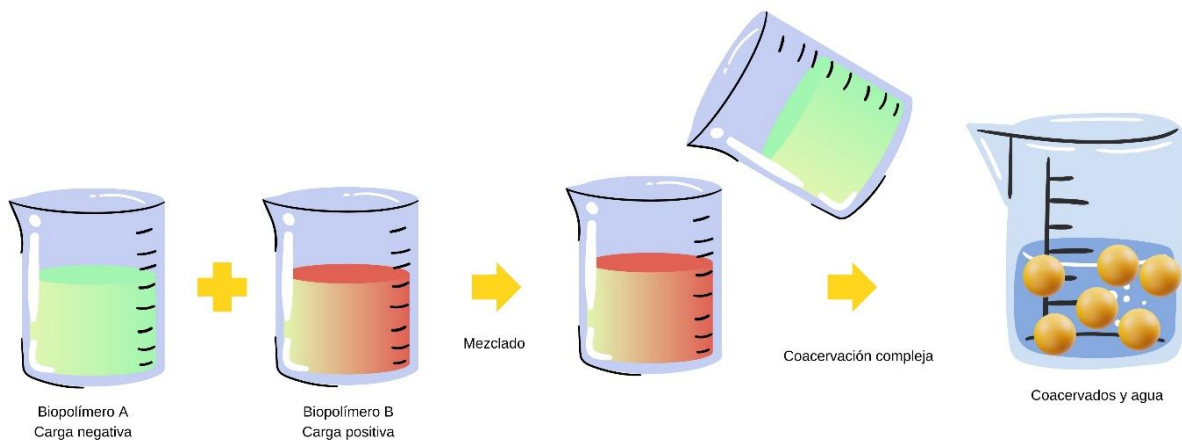


Figura 3. Representación esquemática de la encapsulación por electrospinning y electrospraying

3D Printing–Based Encapsulation

El uso de la impresión 3D en la industria alimentaria ha cobrado relevancia, especialmente en la encapsulación de probióticos. Se ha utilizado en la elaboración de productos personalizados que incorporan probióticos, utilizando técnicas como el secado por liofilización o aspersión. Con los avances recientes en impresión 4D, 5D y

hasta 6D en el ámbito alimentario, se espera que estas tecnologías también contribuyan a mejorar la encapsulación de probióticos, incrementando su estabilidad, tasa de supervivencia y el valor nutricional de los alimentos funcionales (Bazzaz et al., 2025).

Co-cristalización

La cocrystalización es una técnica emergente de encapsulación que mejora las propiedades físicas de los compuestos activos mediante la formación de una matriz porosa de sacarosa. Este proceso transforma los cristales de sacarosa de una estructura perfecta a una forma irregular y aglomerada, generando una red con alta porosidad que inmoviliza y protege el compuesto bioactivo. Ocurre en soluciones sobresaturadas de sacarosa, a temperaturas superiores a 120 °C y bajo contenido de humedad, facilitando una cristalización rápida. Factores como la humedad, la temperatura y la presencia de azúcares como glucosa, fructosa o jarabe de maíz influyen en la solubilidad y en la velocidad de formación de cristales. Además de facilitar la cristalización conjunta de la sacarosa y del compuesto activo, esta técnica permite una inclusión eficaz del ingrediente en los espacios de la red cristalina, protegiéndolo frente a la degradación (Bazzaz et al., 2025).

Materiales de pared

Los materiales de pared desempeñan un papel fundamental en los sistemas de microencapsulación, ya que sus propiedades determinan en gran medida la eficiencia del proceso y la funcionalidad del producto final. Características como la estructura molecular, la capacidad formadora de película, la estabilidad de la emulsión y el comportamiento reológico influyen directamente en parámetros clave del proceso, incluyendo el tamaño de las gotas, el contenido de humedad, la eficiencia de encapsulación, la morfología, la distribución del tamaño de partícula, la densidad aparente y otras propiedades fisicoquímicas. En particular, las propiedades reológicas del líquido de alimentación, formado por la mezcla del material de núcleo con los materiales de pared, son indicativas de los cambios de textura que ocurren durante el procesamiento, y afectan aspectos cruciales como la estabilidad, la dispersabilidad, el perfil de liberación y la velocidad de incrustación del compuesto activo. El rendimiento y la eficiencia de la microencapsulación constituyen indicadores esenciales para evaluar la idoneidad de un material de pared, ya que reflejan tanto la capacidad de encapsulación del ingrediente bioactivo como la calidad global del producto. Para optimizar estos resultados, la elección del material de

recubrimiento debe basarse en las necesidades específicas del compuesto encapsulado, considerando factores como la estabilidad fisicoquímica, las propiedades sensoriales, la retención, la carga y la liberación del bioactivo. En términos generales, se considera que los materiales de pared ideales deben presentar alta solubilidad, baja higroscopicidad, buena capacidad emulsificante, aptitud para formar películas estables, capacidad de enmascaramiento de sabores y un costo económico reducido (Lu et al., 2021).

Los materiales poliméricos se han empleado ampliamente como recubrimientos en sistemas de microencapsulación debido a su capacidad para ofrecer propiedades de barrera adecuadas y permitir una liberación controlada de los ingredientes activos. No obstante, estos sistemas presentan limitaciones importantes, como la lixiviación indeseada del contenido encapsulado y el uso de polímeros no biodegradables, lo que plantea desafíos en términos de seguridad y sostenibilidad. Además, el alto costo energético asociado a la producción de microcápsulas representa un aspecto crítico al diseñar procesos industriales eficientes. Se busca que las microcápsulas sean eficientes, económicas, seguras, funcionales y respetuosas con el medio ambiente, haciendo énfasis en el diseño sostenible de microcápsulas y la evaluación de su biodegradabilidad conforme a las regulaciones vigentes de la Unión Europea (García et al., 2024; Lobel et al., 2024).

Entre los biomateriales utilizados, destacan los recubrimientos de origen proteico como la gelatina y las proteínas de suero bovino, empleados individualmente o en combinación con polisacáridos mediante reticulación. Dentro de estos últimos, el alginato, derivado de algas marinas, es uno de los más utilizados en la encapsulación de probióticos, aunque su desempeño puede verse afectado por la producción de ácido láctico. Otros ejemplos incluyen derivados de celulosa, almidón y quitosano, este último extraído de la quitina presente en crustáceos, insectos y hongos filamentosos (García et al., 2024; Lobel et al., 2024). Generalmente, los sistemas de microencapsulación de pared se pueden dividir en dos categorías: usando un solo tipo de material (carbohidratos, proteínas o gomas

hidrófilas) y usando varios materiales de pared (tipo mixto). (Lu et al., 2021).

Características negativas y desafíos

A futuro, uno de los principales desafíos en la aplicación de tecnologías de encapsulación y co-encapsulación en alimentos es lograr un equilibrio entre funcionalidad, estabilidad y aceptación del consumidor. La efectividad de estas tecnologías depende no solo de la elección adecuada de compuestos bioactivos, probióticos y materiales de pared, sino también del control preciso de las condiciones de procesamiento, almacenamiento y liberación en el organismo. Es indispensable estudiar la estabilidad de los ingredientes encapsulados frente a procesos térmicos, cambios de pH, interacción con la matriz alimentaria y condiciones de almacenamiento prolongado, ya que pueden comprometer tanto sus propiedades funcionales como las sensoriales del producto final. La limitada viabilidad de probióticos en sistemas reales, incluso en condiciones de refrigeración, pone en evidencia la necesidad de nuevos materiales encapsulantes, resistentes y biocompatibles, que ofrezcan protección efectiva y liberen los compuestos de forma controlada (Lobel et al., 2024). Además, persisten retos en la escalabilidad industrial de tecnologías emergentes como el electrohilado, la impresión 3D o la co-cristalización, cuyo alto costo, complejidad técnica o variabilidad estructural pueden dificultar su implementación comercial. Otro reto importante es la falta de estudios clínicos e in vivo que respalden la eficacia y la bioaccesibilidad de los ingredientes encapsulados, especialmente en lo referente a su tránsito intestinal, absorción y beneficios fisiológicos. La integración de herramientas como la simulación gastrointestinal y los modelos dinámicos in vitro puede ayudar a superar estas barreras. Finalmente, se requiere innovación en envases activos que actúen como barrera contra factores ambientales, y al mismo tiempo, investigación regulatoria y multidisciplinaria para desarrollar alimentos funcionales eficaces, seguros y atractivos para el mercado (Bazzaz et al., 2025).

Conclusiones

La microencapsulación se ha consolidado como una herramienta esencial en el desarrollo de alimentos funcionales,

permitiendo proteger y liberar de manera controlada compuestos bioactivos sensibles como probióticos, vitaminas, antioxidantes y enzimas. Las técnicas convencionales como el secado por aspersión, la liofilización, la coacervación o la gelificación iónica han demostrado ser efectivas, aunque presentan limitaciones relacionadas con la estabilidad térmica, la eficiencia de encapsulación o el tamaño de partícula. En respuesta a estas limitaciones, han emergido nuevas tecnologías con alto potencial en el sector alimentario, como la co-encapsulación, el electrohilado (electrospinning), la impresión 3D, la cocrystalización y las emulsiones Pickering. Estas técnicas permiten una mayor precisión estructural, mejor viabilidad de los compuestos activos, mayor control en la liberación y mejoras en la estabilidad durante el almacenamiento y procesamiento.

A pesar de estos avances, persisten desafíos relevantes, como la necesidad de materiales de pared más sostenibles, biodegradables y funcionales, así como una mejor comprensión de la interacción entre los compuestos encapsulados y la matriz alimentaria. Además, la aceptación del consumidor, la escalabilidad industrial y el cumplimiento de normativas regulatorias también representan factores críticos a considerar. En este contexto, la microencapsulación se perfila como una estrategia prometedora para formular productos con beneficios sinérgicos. La investigación futura debe enfocarse en optimizar estas tecnologías emergentes bajo un enfoque sostenible, seguro y eficaz, alineado con los objetivos de innovación y salud pública en la industria alimentaria.

Referencias

- Bazzaz, S., Abbasi, A., Ghotbabad, A. G., Pourjafar, H., & Hosseini, H. (2025). Novel Encapsulation Approaches in the Functional Food Industry: With a Focus on Probiotic Cells and Bioactive Compounds. In *Probiotics and Antimicrobial Proteins* (Vol. 17, Issue 3, pp. 1132–1170). Springer.
<https://doi.org/10.1007/s12602-024-10364-7>
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The Role of Microencapsulation in Food Application. *Molecules*, 27(5), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Candiani, A., Diana, G., Martoccia, M., Travaglia, F., Giovannelli, L., Coïsson, J. D., &

- Segale, L. (2023). Microencapsulation of a Pickering Oil/Water Emulsion Loaded with Vitamin D3. *Gels*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/gels9030255>
- da Silva-Padilha, M. P., Comunian, T. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2025). Complex Coacervation for Encapsulation of Bioactive Compounds, Nutrients, and Probiotics. In S. Cristina De Pinho & C. S. Favaro-Trindade (Eds.), *Methods and Protocols in Food Science. Bioactives Encapsulation. Food Applications* (pp. 1–22). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4538-3>
- Furuta, T., & Neoh, T. L. (2021). Microencapsulation of food bioactive components by spray drying: A review. *Drying Technology*, 39(12), 1800–1831. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1862181>
- García, M. A., Torres, D., & Casariego, A. (2024). Microencapsulation of bioactive compounds in the food industry. *Journal of Advances in Education, Sciences and Humanities*, 3(1), 43–54. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14816620>
- Henrique-Gomes de Sá, S., de Freitas-Santos, P. D., & Favaro-Trindade, C. S. (2025). Microencapsulation of Bioactive- Rich Materials by the Combination of Spray Drying and Spray Chilling. In S. Cristina-De Pinho, C. Silvia, & Favaro-Trindade (Eds.), *Methods and Protocols in Food Science Bioactives Encapsulation Food Applications* (pp. 85–98). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4538-3_6
- Lobel, B. T., Baiocco, D., Al-Sharabi, M., Routh, A. F., Zhang, Z., & Cayre, O. J. (2024). Current Challenges in Microcapsule Designs and Microencapsulation Processes: A Review. In *ACS Applied Materials and Interfaces* (Vol. 16, Issue 31, pp. 40326–40355). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsmi.4c02462>
- Lu, W., Yang, X., Shen, J., Li, Z., Tan, S., Liu, W., & Cheng, Z. (2021). Choosing the appropriate wall materials for spray-drying microencapsulation of natural bioactive ingredients: Taking phenolic compounds as examples. *Powder Technology*, 394, 562–574. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.082>
- Ma, M., Liu, Y., Chen, Y., Zhang, S., & Yuan, Y. (2025). Co-encapsulation: An effective strategy to enhance the synergistic effects of probiotics and polyphenols. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 158). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104927>
- Misra, S., Pandey, P., & Mishra, H. N. (2021). Novel approaches for co-encapsulation of probiotic bacteria with bioactive compounds, their health benefits and functional food product development: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 109, pp. 340–351). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.039>
- Shanuke, D. S., Ranasinghage, N. B. D. P., Illippangama, A. U., Kulathunga, J., & Bandara, M. D. (2025). Co-Encapsulation of Probiotics and Prebiotics: Techniques and Applications in Food Fortification. In *Food Science and Nutrition* (Vol. 13, Issue 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70426>
- Timilsena, Y. P., Akanbi, T. O., Khalid, N., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2019). Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 121, pp. 1276–1286). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.144>
- Vanare, S. P., Singh, R. K., Chen, J., & Kong, F. (2025). Double Emulsion Microencapsulation System for Lactobacillus rhamnosus GG Using Pea Protein and Cellulose Nanocrystals. *Foods*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/foods14050831>