

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

[DOI 10.35381/cm.v12i2.2134](https://doi.org/10.35381/cm.v12i2.2134)

**Micro y nano-encapsulación de compuestos bioactivos y aceites
esenciales en matrices poliméricas para estabilidad farmacéutica**

**Micro- and nanoencapsulation of bioactive compounds and essential oils
in polymeric matrices for pharmaceutical stability**

Anthony Josue Loor-Holguín
pamela.cobos.51@est.ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0009-0003-0869-8466>

Jonathan Xavier Rivera-Tuba
anthony.loor@est.ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0009-0000-9602-1145>

Recepción: 15 de diciembre 2025
Revisado: 26 de febrero 2026
Aprobación: 15 de marzo 2026
Publicado: 01 de abril 2026

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue analizar la Micro y nano-encapsulación de compuestos bioactivos y aceites esenciales en matrices poliméricas para estabilidad farmacéutica. Metodológicamente se realizó una revisión bibliográfica de carácter analítico y comparativo mediante la selección de artículos científicos publicados entre 2018 y 2025 en bases de datos como PubMed, Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Los resultados, indicaron que las matrices poliméricas naturales como quitosano, alginato y gelatina mostraron alta biocompatibilidad, mientras que polímeros sintéticos como PLGA y Eudragit® permitieron mayor control en la liberación sostenida y dependiente del pH. Los sistemas nano-encapsulados evidenciaron mayor estabilidad y eficiencia encapsulante frente a sistemas micro-encapsulados. En Conclusión, la micro y nano-encapsulación en matrices poliméricas constituye una estrategia eficaz para mejorar la estabilidad fisicoquímica y optimizar los perfiles de liberación farmacéutica de compuestos bioactivos con potencial aplicación terapéutica.

Descriptores: Análisis bioquímico; análisis comparativo; compuesto químico; polímero; farmacología. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the micro- and nanoencapsulation of bioactive compounds and essential oils in polymeric matrices for pharmaceutical stability. Methodologically, an analytical and comparative literature review was conducted by selecting scientific articles published between 2018 and 2025 in databases such as PubMed, Scopus, Web of Science, and ScienceDirect. The results indicated that natural polymer matrices such as chitosan, alginate, and gelatin exhibited high biocompatibility, while synthetic polymers such as PLGA and Eudragit® allowed for greater control over sustained and pH-dependent release. Nano-encapsulated systems demonstrated greater stability and encapsulation efficiency compared to microencapsulated systems. In conclusion, micro- and nanoencapsulation in polymeric matrices constitutes an effective strategy for improving physicochemical stability and optimizing the pharmaceutical release profiles of bioactive compounds with potential therapeutic applications.

Descriptors: Biochemical analysis; comparative analysis; chemical compound; polymer; pharmacology. (UNESCO Thesaurus).

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

INTRODUCCIÓN

El interés por los compuestos bioactivos de origen natural ha crecido de forma sostenida debido a su amplio repertorio farmacológico. Flavonoides, terpenos, polifenoles y aceites esenciales han mostrado actividad antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana, antiproliferativa y moduladora de diversas vías celulares, lo cual los convierte en candidatos atractivos para sistemas terapéuticos contemporáneos (Cimino et al., 2021). A pesar de este potencial, la mayoría de estas moléculas presenta limitaciones biofarmacéuticas importantes: baja estabilidad frente a oxígeno, luz y calor; elevada volatilidad en el caso de los aceites esenciales; pobre solubilidad en medios acuosos; rápida degradación metabólica y biodisponibilidad oral irregular (Weisany et al,2022).

En el ámbito farmacéutico, estas limitaciones no solo comprometen la eficacia, sino también la reproducibilidad de la respuesta terapéutica y la factibilidad de escalar formulaciones a nivel industrial. Por ello, la encapsulación en matrices poliméricas se ha posicionado como una respuesta tecnológica racional: permite crear una barrera física frente al ambiente, modular la interacción del bioactivo con el medio biológico y diseñar mecanismos de liberación controlada o dirigida (Sousa, 2022; Paleiro et al., 2021).

La micro-encapsulación y la nano-encapsulación comparten el objetivo de proteger y vehiculizar el principio activo, pero difieren en el tamaño de partícula, el área superficial, la interacción con membranas biológicas y la capacidad de direccionamiento. Los sistemas micro-encapsulados suelen ser útiles para estabilización, enmascaramiento y protección durante procesamiento o almacenamiento, mientras que los sistemas nano-encapsulados ofrecen ventajas adicionales sobre permeación, captación celular, mucoadhesión y liberación sitio-específica (Sousa, 2022; Paleiro et al., 2021; Weisany et al,2022).

No obstante, la elección de una técnica o matriz polimérica no puede hacerse de manera genérica. El comportamiento del sistema depende del tipo de compuesto encapsulado, de sus propiedades ácido-base e hidrofóbicas, del método de

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

preparación, del entrecruzamiento polimérico, del tamaño y de la morfología obtenidos. Incluso formulaciones que utilizan el mismo polímero pueden exhibir perfiles de liberación y estabilidad muy diferentes según el solvente empleado, la relación polímero: activo o el grado de modificación química del polímero (Dupuis et al., 2022; Paleiro et al., 2021; Bahramineiad, 2024; Aldawsari et al., 2023).

En consecuencia, resulta pertinente integrar críticamente la evidencia disponible para reconocer qué estrategias ofrecen mejores resultados cuando el objetivo no es solo encapsular, sino también mejorar la estabilidad farmacéutica y obtener una liberación reproducible. Bajo esta premisa, el presente trabajo revisa las principales tecnologías de micro y nano-encapsulación en matrices poliméricas, compara materiales naturales y sintéticos, y discute las tendencias actuales relacionadas con estabilidad, biodisponibilidad y modelos cinéticos de liberación.

MÉTODO

La presente investigación se desarrolló como una revisión bibliográfica narrativa con orientación analítica y comparativa. La estrategia de búsqueda se dirigió a literatura científica indexada en PubMed, Scopus, Web of Science y ScienceDirect, empleando combinaciones de términos en inglés y español como “micro-encapsulation”, “nano-encapsulation”, “essential oils”, “bioactive compounds”, “polymeric matrices”, “controlled release”, “chitosan”, “alginate”, “PLGA” y “Eudragit”. Se priorizaron artículos publicados entre 2018 y 2025, aunque se incorporaron referencias previas consideradas clásicas o conceptualmente indispensables para definir principios de encapsulación, comportamiento de nanoemulsiones y fundamentos de liberación controlada. Para preservar el enfoque farmacéutico del artículo, se seleccionaron preferentemente revisiones y estudios experimentales que abordaran estabilidad, caracterización fisicoquímica, eficiencia de encapsulación, liberación in vitro o evaluación biológica en contextos biomédicos o de administración de fármacos.

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

Se excluyeron publicaciones centradas exclusivamente en aplicaciones alimentarias o cosméticas cuando no aportaban información extrapolable a sistemas farmacéuticos. El análisis se organizó en cinco ejes: a) limitaciones biofarmacéuticas de compuestos bioactivos y aceites esenciales; b) principales técnicas de micro y nano-encapsulación; c) matrices poliméricas naturales y sintéticas; d) efecto sobre la estabilidad fisicoquímica; y e) comportamiento de liberación y modelos cinéticos. La síntesis final se elaboró mediante contraste entre revisiones recientes y estudios experimentales representativos, con énfasis en resultados comparables y relevancia tecnológica.

Limitaciones farmacéuticas de los compuestos bioactivos y aceites esenciales

La bioactividad de estos compuestos no garantiza por sí misma un comportamiento farmacéutico favorable. Muchos metabolitos vegetales poseen núcleos aromáticos hidrofóbicos, múltiples dobles enlaces o grupos fenólicos que facilitan reacciones de oxidación, isomerización y degradación fotoquímica. Los aceites esenciales, además, contienen mezclas complejas de monoterpenos, sesquiterpenos y fenilpropanoides altamente volátiles, lo que dificulta su conservación y dosificación (Weisany et al., 2022).

Desde una perspectiva biofarmacéutica, los problemas más frecuentes son la baja solubilidad aparente, la dispersión heterogénea en vehículos acuosos y la rápida pérdida del compuesto antes de alcanzar el sitio terapéutico. Estas restricciones reducen la concentración efectiva disponible y obligan a utilizar dosis mayores, lo que puede incrementar irritación local, variabilidad entre lotes o inestabilidad durante el almacenamiento (Weisany et al., 2022).

La encapsulación pretende resolver simultáneamente varios de estos problemas. Primero, actúa como barrera frente a la exposición ambiental; segundo, puede mejorar la dispersabilidad del activo en medios fisiológicos; tercero, permite diseñar perfiles de liberación sostenida, pulsátil o sensible a pH; y cuarto, en escala nanométrica puede favorecer la interacción con mucosas y tejidos diana (Sousa,

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

2022; Paleiro et al.,2021; Zhang et al.,2021). No obstante, el éxito de la formulación depende de una correspondencia adecuada entre el bioactivo, la pared polimérica y el método de producción.

Principales técnicas de micro y nano-encapsulación

Secado por aspersión

El secado por aspersión continúa siendo una de las técnicas de microencapsulación más empleadas por su escalabilidad, costo relativamente bajo y compatibilidad con producción industrial. Consiste en atomizar una emulsión o dispersión que contiene el bioactivo y el material encapsulante dentro de una corriente de aire caliente, generando partículas secas en tiempos cortos (Sousa, 2022; Dupuis et al.,2022).

Su principal fortaleza es la obtención de polvos estables y fáciles de incorporar a formas farmacéuticas sólidas o semisólidas. Sin embargo, la exposición térmica puede resultar crítica para compuestos muy sensibles, y la retención del aceite esencial depende de variables como temperatura de entrada, viscosidad, emulsificante y composición de la pared. Aun con estas limitaciones, las revisiones recientes siguen considerándolo un método robusto para estabilización y protección primaria de compuestos volátiles (Sousa, 2022; Dupuis et al.,2022).

Coacervación compleja

La coacervación compleja aprovecha la interacción electrostática entre biopolímeros de carga opuesta para formar una cubierta alrededor del activo. La técnica es especialmente útil cuando se requieren microcápsulas con alta capacidad de carga y protección frente a oxidación, aunque el control del pH, la fuerza iónica y la relación entre polímeros es decisivo para lograr estructuras reproducibles (Sousa, 2022; Dupuis et al.,2022; Weisany et al., 2022).

En comparación con el secado por aspersión, la coacervación suele favorecer una mejor retención del activo volátil, pero implica formulaciones más sensibles a cambios de proceso y, en algunos casos, etapas adicionales de endurecimiento o

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

secado. Por ello, su interés farmacéutico reside sobre todo en sistemas donde la integridad del bioactivo es prioritaria frente a la simplicidad operativa (Sousa, 2022; Weisany et al., 2022).

Gelificación iónica y formación de hidrogeles

La gelificación iónica es particularmente relevante para alginato y quitosano. El alginato forma redes hidrogélicas en presencia de cationes divalentes como Ca^{2+} , mientras que el quitosano suele entrecruzarse mediante aniones polifosfato como tripolifosfato de sodio. Estas formulaciones son apreciadas por su sencillez, uso de medios acuosos y buena biocompatibilidad (Chiriac, 2021; Soltanzadeh, 2021; Dupuis et al., 2022).

En estudios recientes, microsferas de alginato para aceites de tomillo y caléndula, así como perlas de alginato modificadas con octenilsuccinato para aceite de bergamota, mostraron mejoras en estabilidad y liberación modulada bajo condiciones simuladas (Bahraminejad, 2024; Cakir, 2024). La capacidad de estos sistemas para hincharse y responder al pH gastrointestinal resulta especialmente útil en liberación entérica o colon-dirigida.

Nano-precipitación y sistemas nanoparticulados

La nano-precipitación es una técnica ampliamente utilizada para fabricar nanopartículas poliméricas a partir de la rápida difusión de un solvente miscible en una fase no solvente, lo que induce la precipitación del polímero y la formación de partículas nanométricas. Su ventaja principal es la obtención de tamaños relativamente uniformes y una estructura adecuada para liberar compuestos poco solubles de manera sostenida (Weisany et al., 2022; Paleiro et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Cuando se emplean polímeros biodegradables como PLGA, la nano-precipitación permite diseñar vehículos con buena reproducibilidad y potencial de traducción farmacéutica. Esta estrategia también puede combinarse con matrices pH-sensibles,

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

generando sistemas híbridos donde una microcubierta protege nanopartículas internas hasta alcanzar un sitio anatómico definido (Zhang et al.,2021).

Nanoemulsiones y sistemas híbridos

Las nanoemulsiones no son equivalentes a las microemulsiones; aunque ambas son dispersiones coloidales, difieren en su mecanismo de formación y estabilidad termodinámica. En el contexto farmacéutico, las nanoemulsiones ofrecen una vía eficaz para vehiculizar compuestos lipofílicos y aceites esenciales, incrementando su dispersabilidad y área interfacial. Cuando se combinan con biopolímeros o geles, pueden transformarse en nanoemulgeles o sistemas híbridos con liberación más prolongada (Cimino et al., 2021; Weisany et al., 2022; Aldawsari et al., 2023).

La literatura reciente muestra que los sistemas híbridos micro-nanoencapsulados son especialmente útiles cuando se necesita un efecto bifásico: una fracción del bioactivo se libera rápidamente y otra permanece asociada a nanopartículas para una liberación sostenida posterior. Este principio fue aprovechado por Zhang y colaboradores en un sistema con nanopartículas de PLGA incorporadas a una matriz de Eudragit FS30D para liberar berberina a nivel colónico (Zhang et al.,2021).

RESULTADOS

Matrices poliméricas empleadas en la encapsulación

Polímeros naturales

Los polímeros naturales conservan gran protagonismo por su biocompatibilidad, biodegradabilidad y relativa seguridad toxicológica. Entre ellos, el quitosano destaca por su capacidad mucoadhesiva, su carga catiónica en medio ácido y su actividad antimicrobiana intrínseca. Estas características favorecen la formación de nanopartículas por gelificación iónica y su interacción con mucosas o superficies biológicas (Chiriac,2021; Soltanzadeh,2021; Yanx et al.,2021).

El alginato, por su parte, es apreciado por su gelificación suave y su respuesta al pH. Sus redes se hinchan en medios específicos y pueden modular la difusión del activo,

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

por lo que ha sido empleado tanto en microsferas como en perlas, nanogeles y recubrimientos de nanopartículas (Chiriac,2021; Bahramineiad, 2024; Cakir,2024; Carrasco et al.,2023). La gelatina, la pectina y la zeína también son valiosas, ya sea por su capacidad de formar matrices filmógenas o por su utilidad en sistemas combinados con polisacáridos (Dupuis et al., 2022; Chiriac, 2021; Carrasco et al., 2023).

La principal ventaja de estos materiales es que permiten estrategias más “bioinspiradas” y, en muchos casos, menos agresivas para compuestos lábiles. Su principal reto reside en la variabilidad estructural, la sensibilidad a humedad o pH y las limitaciones mecánicas frente a polímeros sintéticos. Por ello, con frecuencia se emplean como parte de mezclas o sistemas multicapa.

Polímeros sintéticos y semisintéticos

Entre los polímeros sintéticos, el poli (ácido láctico-co-glicólico) o PLGA ocupa una posición central por su biodegradabilidad, historial regulatorio favorable y versatilidad para cargar compuestos hidrofóbicos. Las nanopartículas de PLGA permiten reducir la exposición directa del activo al ambiente y sostener la liberación por erosión y difusión a lo largo del tiempo (Dupuis et al., 2022; Weisany et al., 2022; Zhang et al.,2021).

Los copolímeros Eudragit aportan una ventaja adicional: la sensibilidad al pH. Esta familia de polímeros acrílicos posibilita recubrimientos entéricos o colónicos, por lo que resulta útil cuando el objetivo es proteger el compuesto de condiciones gástricas y liberarlo en el intestino distal. El sistema híbrido descrito para berberina, en el que nanopartículas de PLGA se integran dentro de una matriz de Eudragit FS30D, es un ejemplo claro del uso racional de polímeros con funciones complementarias (Zhang et al.,2021).

Otros materiales como PVA se utilizan como estabilizantes, coformadores de matriz o componentes de nanogeles. En general, los polímeros sintéticos ofrecen mejor control estructural y reproducibilidad, aunque pueden requerir procesos más

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

complejos y solventes orgánicos, por lo que su selección debe equilibrar desempeño farmacéutico y viabilidad de manufactura.

Impacto de la encapsulación sobre la estabilidad fisicoquímica

La estabilización del compuesto encapsulado constituye uno de los argumentos más sólidos a favor de estas tecnologías. Las cubiertas poliméricas pueden disminuir el contacto del bioactivo con oxígeno, luz y humedad, además de limitar la evaporación de constituyentes volátiles. Esto resulta particularmente relevante en aceites esenciales ricos en monoterpenos, cuya pérdida por volatilización altera tanto la potencia como el perfil químico del producto (Chiriac, 2021).

La mejora de estabilidad se observa de forma consistente en estudios con quitosano; encapsularon aceite esencial de lemongrass en nanopartículas de quitosano y reportaron partículas esféricas con tamaños entre 175 y 235 nm, además de estabilidad estructural y liberación in vitro controlada. De manera similar, Yousefi et al. describieron para aceite esencial de jengibre encapsulado en quitosano-tripolifosfato eficiencias de encapsulación de 49.11% a 68.32% y una liberación inicial seguida de fase lenta, con mayor velocidad de salida en medio ácido (Yousefi, 2022). Granata et al. obtuvieron encapsulación de aceites de orégano y tomillo en nanopartículas de quitosano con eficiencias del 80% al 83% y zeta potencial superior a 40 mV, lo que evidenció buena estabilidad coloidal incluso bajo condiciones de almacenamiento de 4 y 40 °C (Grananata et al., 2021).

En matrices de alginato también se han observado mejoras relevantes. Bahraminejad et al. evaluaron perlas de alginato y alginato octenilsuccinato cargadas con aceite esencial de bergamota y documentaron propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y de liberación favorables, confirmando que la modificación química del polímero altera la interacción con el bioactivo y el patrón de salida (Bahraminejad, 2024). Çakır y Gürkan, al microencapsular aceites de tomillo y caléndula en alginato mediante gelificación iónica, mostraron que el sistema mejoró

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

la protección de compuestos inestables y permitió ensayos de disolución bajo condiciones simuladas con comportamiento controlado (Cakir, 2024).

En sistemas para bioactivos no volátiles, el efecto protector también es visible. Ferreira et al. desarrollaron sistemas cargados con quercetina y observaron liberaciones diferenciadas según el peso molecular del quitosano, además de mejora en la biodisponibilidad aparente sobre células de cáncer cervical (Ferreira et al, 2023). Carrasco-Sandoval et al. demostraron que el peso molecular y el grado de desacetilación del quitosano modifican la bioaccesibilidad de quercetina encapsulada en nanopartículas de zeína recubiertas con alginato/quitosano (Carrasco et al.,2023). Estos hallazgos ponen de manifiesto que la estabilidad no depende únicamente del “tipo de polímero”, sino también de su arquitectura molecular y de la interfaz polímero-activo.

Perfiles de liberación farmacéutica y modelos cinéticos

El perfil de liberación es el vínculo entre la formulación y su desempeño terapéutico. Una misma matriz puede comportarse como barrera difusional, sistema de erosión o reservorio, dependiendo del grado de entrecruzamiento, del tamaño de partícula y de la afinidad entre el activo y el polímero. Por ello, la liberación de compuestos encapsulados suele explicarse mediante más de un mecanismo simultáneo (Sousa,2022; Paleiro et al., 2021).

En matrices hidrofílicas o hidrogeles de alginato, la liberación suele estar influida por el hinchamiento y la difusión a través de la red acuosa. En nanopartículas de quitosano, además de la difusión, intervienen la protonación del polímero y su interacción con el medio, lo que puede acelerar la salida del activo en condiciones ácidas (Yousefi,2022). Los sistemas basados en PLGA combinan difusión inicial con erosión paulatina de la matriz, facilitando liberación sostenida a lo largo de horas o días (Zhang et al.,2021; Aldawsari et al.,2023).

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

La literatura sobre bioactivos encapsulados recurre con frecuencia a los modelos de orden cero, primer orden, Higuchi y Korsmeyer-Peppas. El modelo de Higuchi se asocia a matrices donde predomina la difusión desde un sólido poroso; el modelo de Korsmeyer-Peppas es especialmente útil cuando el sistema no responde a una sola mecánica de liberación y permite inferir si el transporte es predominantemente fickiano, anómalo o gobernado por relajación de cadenas poliméricas. En revisiones recientes se recalca que la interpretación cinética debe acompañarse siempre de la caracterización estructural del sistema, porque un buen ajuste matemático por sí solo no esclarece el mecanismo real.

Los sistemas híbridos ilustran bien esta complejidad. Zhang et al. desarrollaron un sistema micro- y nanoencapsulado para berberina en el que una matriz de Eudragit sensible al pH liberaba el contenido al alcanzar el colon, mientras las nanopartículas internas de PLGA proporcionaban una segunda fase de liberación sostenida posterior a la absorción local (Zhang et al., 2021). En otro enfoque, Aldawsari et al. formularon nanopartículas PVA/PLGA y posteriormente un nanogel con aceite esencial de lemongrass; el sistema mostró una liberación más lenta que el aceite libre, con 50.65% liberado por las nanopartículas en 15 horas y mayor control en el nanogel final (Aldawsari et al., 2023). Este tipo de resultados respalda la idea de que la formulación puede diseñarse para combinar efecto inmediato y mantenimiento terapéutico.

DISCUSIÓN

La evidencia revisada permite afirmar que no existe una única estrategia superior para todos los compuestos bioactivos. La microencapsulación sigue siendo muy competitiva cuando el objetivo principal es proteger el compuesto durante almacenamiento, enmascarar olor/sabor o producir polvos estables de fácil escalado. En cambio, la nanoencapsulación ofrece ventajas claras cuando se requiere mejorar dispersión, permeación biológica o dirigir la liberación hacia una localización concreta (Sousa, 2022; Paleiro et al., 2021).

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

Los polímeros naturales destacan por su biocompatibilidad y por la posibilidad de generar sistemas sensibles al entorno fisiológico. Quitosano y alginato son los ejemplos más consistentes: el primero aporta mucoadhesión y carga positiva, mientras que el segundo facilita gelificación suave y respuesta a pH. Sin embargo, estos materiales presentan variabilidad composicional y, en determinadas condiciones, menor reproducibilidad mecánica o estructural que PLGA y Eudragit (Chiriac,2021; Carrasco et al.,2023).

Los polímeros sintéticos y semisintéticos aportan un nivel superior de ingeniería farmacéutica. PLGA proporciona control sobre degradación y liberación, mientras que Eudragit permite diseñar sistemas enterosolubles y colon-dirigidos. El inconveniente radica en procesos de manufactura más complejos y, con frecuencia, necesidad de solventes orgánicos o etapas de secado más exigentes (Dupuis et al.2022; Weisany et al.,2022; Zhang et al.,2021; Aldawsari et al., 2023).

Desde la perspectiva de estabilidad, la encapsulación suele mejorar de manera consistente la retención del activo, pero la magnitud del beneficio depende de la compatibilidad química entre el bioactivo y la matriz. Un aceite esencial fuertemente hidrofóbico puede estabilizarse bien en una nanopartícula, pero liberarse de forma demasiado lenta o heterogénea si la interacción con el polímero es excesiva. De manera inversa, una red muy porosa puede preservar poco el compuesto, aunque favorezca la difusión. Por eso, la literatura más reciente insiste en optimizar no solo el material, sino también el tamaño de partícula, el grado de entrecruzamiento y la química superficial (Dupuis et al.2022; Bahramineiad, 2024; Paleiro et al., 2021).

Finalmente, existe una brecha entre la abundancia de estudios de laboratorio y la escasez de trabajos con verdadera orientación preclínica o traslacional. Muchas publicaciones demuestran estabilidad, tamaño o actividad antimicrobiana in vitro, pero pocas avanzan hacia farmacocinética, seguridad a largo plazo, escalado y evaluación regulatoria. Este vacío limita la conversión de sistemas promisorios en formulaciones farmacéuticas comercializables. En consecuencia, el diseño futuro

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

debería priorizar formulaciones reproducibles, evaluaciones de estabilidad acelerada, validación de modelos cinéticos y estudios in vivo bien estructurados.

CONCLUSIONES

Las estrategias de micro y nanoencapsulación en matrices poliméricas representan una herramienta sólida para superar las limitaciones fisicoquímicas y biofarmacéuticas de compuestos bioactivos y aceites esenciales. La literatura examinada muestra que la encapsulación puede disminuir pérdidas por volatilización, proteger frente a oxidación y fotodegradación, mejorar la dispersabilidad y modular la liberación del principio activo (Sousa, 2022; Paleiro et al., 2021).

Entre los polímeros naturales, quitosano y alginato destacan por su biocompatibilidad, mucoadhesión y respuesta al pH; entre los sintéticos, PLGA y Eudragit permiten un control más fino del sitio y la velocidad de liberación (Chiriac, 2021; Zhang et al., 2021). En términos de técnica, el secado por aspersión conserva su valor industrial, mientras que la gelificación iónica, la nano-precipitación y los sistemas híbridos muestran mayor versatilidad para fines farmacéuticos avanzados (Sousa, 2022; Paleiro et al., 2021; Zhang et al., 2021; Aldawsari et al., 2023).

La selección de la estrategia encapsulante debe basarse en la naturaleza del bioactivo, el objetivo terapéutico, la vía de administración y el perfil de liberación requerido. No basta con obtener alta eficiencia de encapsulación; es imprescindible demostrar estabilidad real, reproducibilidad y mecanismos de liberación interpretables. Bajo esta lógica, los sistemas híbridos y las matrices poliméricas funcionalizadas representan una de las rutas más prometedoras para futuras formulaciones farmacéuticas con compuestos naturales.

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A todos los factores sociales que influyeron en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Aldawsari MF, Foudah AI, Rawat P, Alam A, Salkini MA. (2023). Nanogel-based delivery system for lemongrass essential oil: a promising approach to overcome antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa* infections. *Gels*;9(9), p.741. <https://n9.cl/vhadf1>
- Bahraminejad S, Mousavi M, Askari G, Gharaghani M, Pourramzan H. (2024). Octenylsuccinated alginate as a delivery agent for encapsulation of bergamot essential oil: preparation, functional properties and release behavior. *Int J Biol Macromol*;282(1), p.136616. <https://n9.cl/ria4y8>
- Cimino C, Maurel OM, Musumeci T, Bonaccorso A, Drago F, Souto EB. (2021). Essential oils: pharmaceutical applications and encapsulation strategies into lipid-based delivery systems. *Pharmaceutics*;13(3), p.327. <https://n9.cl/eqh6j>
- Çakır C, Gürkan EH. (2024). Enhancing therapeutic effects alginate microencapsulation of thyme and calendula oils using ionic gelation for controlled drug delivery. *J Biomater Sci Polym Ed*;35(17), p.2611-2639. <https://n9.cl/ip0foe>
- Carrasco-Sandoval J, Aranda M, Henríquez-Aedo K, Fernández M, López-Rubio A, Fabra MJ. (2023). Impact of molecular weight and deacetylation degree of chitosan on the bioaccessibility of quercetin encapsulated in alginate/chitosan-coated zein nanoparticles. *Int J Biol Macromol*;242(2), p.124876. <https://n9.cl/98ddk>
- Chiriac AP, Rusu AG, Nita LE, Chiriac VM, Neamtu I, Sandu A. (2021). Polymeric carriers designed for encapsulation of essential oils with biological activity. *Pharmaceutics*;13(5), p.631. <https://n9.cl/9n819k>
- Dupuis V, Cerbu C, Witkowski L, Potarniche AV, Timar MC, Zychska M. (2022). Nanodelivery of essential oils as efficient tools against antimicrobial resistance: a review of the type and physical-chemical properties of the delivery systems and applications. *Drug Deliv*;29(1), p.1007-1024. <https://n9.cl/k9lskq>

Anthony Josue Loor-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

- Ferreira M, Gomes D, Neto M, Passarinha LA, Costa D, Sousa A. (2023). Development and characterization of quercetin-loaded delivery systems for increasing its bioavailability in cervical cancer cells. *Pharmaceutics*;15(3), p.936. <https://n9.cl/dukovg>
- Granata G, Stracquadanio S, Leonardi M, Napoli E, Malandrino G, Cafiso V. (2021). Oregano and thyme essential oils encapsulated in chitosan nanoparticles as effective antimicrobial agents against foodborne pathogens. *Molecules*. 2021;26(13), p.4055. <https://n9.cl/i5ji7>
- Pateiro M, Gómez B, Munekata PES, Barba FJ, Putnik P, Bursać Kovačević D. (2021). Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality and the appearance of the final food products. *Molecules*;26(6), p.1547. <https://n9.cl/v6e60>
- Sousa VI, Parente JF, Marques JF, Forte MA, Tavares CJ. (2022). Microencapsulation of essential oils: a review. *Polymers (Basel)*;14(9), p.1730. <https://n9.cl/nfv40r>
- Soltanzadeh M, Peighambaroust SH, Ghanbarzadeh B, Mohammadi M, Lorenzo JM. (2021). Chitosan nanoparticles encapsulating lemongrass (*Cymbopogon commutatus*) essential oil: physicochemical, structural, antimicrobial and in-vitro release properties. *Int J Biol Macromol*;192, p.1084-1097. <https://n9.cl/jbp3a>
- Weisany W, Yousefi S, Tahir NAR, Golestanehzadeh N, McClements DJ, Adhikari B. (2022). Targeted delivery and controlled released of essential oils using nanoencapsulation: a review. *Adv Colloid Interface Sci*. <https://n9.cl/5kh4k>
- Yan X, Huang Z, Wu Y, Yu Z, Yang K, Chen Z. (2021). Sequential loading of inclusion complex/nanoparticles improves the gastric retention of *Vladimiriae Radix* essential oil to promote the protection of acute gastric mucosal injury. *Int J Pharm*. <https://n9.cl/xv9sdl>
- Yousefi M, Khorshidian N, Mortazavian AM. (2022). Zingiber officinale essential oil-loaded chitosan-tripolyphosphate nanoparticles: fabrication, characterization and in-vitro antioxidant and antibacterial activities. *Food Sci Technol Int*. 2022;28(7), p.592-602. <https://n9.cl/bxc8tx>
- Zhang L, Li M, Zhang G, Gao C, Wang S, Zhang T. (2021). Micro- and nanoencapsulated hybrid delivery system (MNEHDS): a novel approach for colontargeted oral delivery of berberine. *Mol Pharm*;18(4), p.1573-1581. <https://n9.cl/8wp52>

CIENCIAMATRIA

Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología

Año XII. Vol. XII. N°2. Edición Especial 2. 2026

Hecho el depósito de ley: pp201602FA4721

ISSN-L: 2542-3029; ISSN: 2610-802X

Instituto de Investigación y Estudios Avanzados Koinonía (IIEAK). Santa Ana de Coro. Venezuela

Anthony Josue Loo-Holguin; Jonathan Xavier Rivera-Tuba

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)