Salud, Ciencia y Tecnología. 2025; 5:1799
doi: 10.56294/saludcyt20251799

REVISIÓN

Essential oils and microencapsulation: mechanisms and efficacy in the inhibition of biofilms and pathogens

Aceites esenciales y microencapsulación: mecanismos y eficacia en la inhibición de biofilms y patógenos

Elizabeth Proaño-Pérez[1,2], Mario Vilcacundo[1], Víctor Hernán Guangasig Toapanta[1], Alberto Bustillos[3]

[1]Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias de la Salud, Carrera de Laboratorio Clínico.
[2]Universidad Técnica de Ambato, Grupo de investigación Nutrigenx.
[3]Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Agronomía. Ambato, Ecuador.

Citar como: Proaño-Pérez E, Vilcacundo M, Guangasig Toapanta VH, Bustillos A,. Essential oils and microencapsulation: mechanisms and efficacy in the inhibition of biofilms and pathogens. Salud, Ciencia y Tecnología. 2025; 5:1799. https://doi.org/10.56294/saludcyt20251799

Enviado: 30-12-2025 **Revisado:** 14-04-2025 **Aceptado:** 20-06-2025 **Publicado:** 21-06-2025

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González

Autor para la correspondencia: Alberto Bustillos

ABSTRACT

Introduction: essential oils (EOs) have been the subject of extensive investigation due to their diverse biological properties, including antimicrobial, antioxidant, fungicidal, and anti-inflammatory activities. Synthesized by over 17 500 plant species, EOs are intricate mixtures of terpenes, terpenoids, and phenylpropanoids, among other bioactive compounds. These attributes render EOs as promising candidates for addressing microbial infections, particularly those associated with biofilms, which account for a substantial proportion of nosocomial infections and microbial infections at large.
Method: a systematic literature search was performed using the PubMed and SciELO databases. Articles were selected based on predefined inclusion criteria, emphasizing studies that explored the chemical composition and antimicrobial mechanisms of EOs, the processes of biofilm formation, their structural characteristics, resistance mechanisms, and the application of microencapsulation techniques to enhance EO stability and antimicrobial efficacy.
Results: a total of 30 articles met the inclusion criteria and were subjected to detailed review. These studies provide a comprehensive analysis of the antimicrobial potential of EOs and demonstrate the significant enhancement of their efficacy through microencapsulation. The compiled data enable the assessment of both the inherent antimicrobial activity of EOs and the mechanisms by which microencapsulation amplifies this activity.
Conclusions: this review underscores the chemical composition and antimicrobial mechanisms of EOs, as well as the dynamics of biofilm formation and resistance. Furthermore, it highlights the role of microencapsulation as a strategy to preserve and enhance the antimicrobial properties of EOs.

Keywords: Essential Oils; Antimicrobial Activity; Biofilms; Microencapsulation; Chemical Composition; Antimicrobial Mechanisms.

RESUMEN

Introducción: los aceites esenciales (AEs) han sido objeto de una amplia investigación debido a sus diversas propiedades biológicas, incluidas actividades antimicrobianas, antioxidantes, fungicidas y antiinflamatorias. Producidos por más de 17 500 especies vegetales, los AEs son mezclas complejas de terpenos, terpenoides y fenilpropanoides, entre otros compuestos bioactivos. Estas características posicionan a los AEs como candidatos prometedores para abordar infecciones microbianas, especialmente aquellas asociadas con

© 2025; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada

biopelículas, que constituyen una proporción significativa de las infecciones nosocomiales y microbianas en general.
Método: se realizó una búsqueda sistemática de literatura en las bases de datos PubMed y SciELO. Los artículos fueron seleccionados en función de criterios de inclusión predefinidos, con un enfoque en la composición química y los mecanismos antimicrobianos de los AEs, la formación, estructura y resistencia de las biopelículas, así como las técnicas de microencapsulación y sus beneficios en términos de estabilidad y eficacia antimicrobiana.
Resultados: un total de 30 artículos que cumplían con los criterios de inclusión fueron revisados en detalle. Estos estudios ofrecen un análisis exhaustivo del potencial antimicrobiano de los AEs y demuestran la mejora significativa de su eficacia a través de la microencapsulación. Los datos recopilados permiten evaluar tanto la actividad antimicrobiana intrínseca de los AEs como los mecanismos mediante los cuales la microencapsulación amplifica esta actividad.
Conclusiones: esta revisión resalta la composición química y los mecanismos antimicrobianos de los AEs, así como las dinámicas de formación y resistencia de las biopelículas. Además, destaca el papel de la microencapsulación como una estrategia para preservar y potenciar las propiedades antimicrobianas de los AEs.

Palabras clave: Aceites Esenciales; Actividad Antimicrobiana; Biopelículas; Microencapsulación; Composición Química; Mecanismos Antimicrobianos.

INTRODUCCIÓN

Los aceites esenciales (AE) constituyen objetos de investigación ampliamente estudiados por sus destacadas propiedades biológicas, incluyendo actividades antimicrobianas, antioxidantes, fungicidas y antiinflamatorias.[1] Producidos por más de 17 500 especies de plantas, los AE se caracterizan por ser mezclas complejas de terpenos, terpenoides y fenilpropanoides, entre otros compuestos bioactivos.[2] Gracias a su amplio espectro de acción, se han propuesto como candidatos prometedores para el tratamiento de diversas infecciones microbianas, en particular aquellas asociadas con la formación de biofilms, que constituyen una proporción significativa de las infecciones nosocomiales y microbianas en general.[3]

La formación de biofilms es un mecanismo de supervivencia de bacterias y levaduras que favorece su adhesión a superficies, al tiempo que promueve la producción de una matriz extracelular compuesta por proteínas, polisacáridos y ADN.[3] Esta matriz confiere a las comunidades microbianas una marcada resistencia frente a los antimicrobianos convencionales, dificultando su erradicación y complicando el tratamiento de las infecciones resultantes.[4] La robustez intrínseca de los biofilms pone de manifiesto la necesidad de explorar nuevas estrategias que permitan su prevención y control de manera efectiva.

En este contexto, la microencapsulación de aceites esenciales ha surgido como una estrategia de gran interés. Este proceso protege los AE de la volatilización y la degradación, prolongando su vida útil y mejorando su eficacia antimicrobiana.[4] Entre las técnicas utilizadas se incluyen el secado por aspersión, la coacervación compleja y la liofilización, todas ellas eficaces para la estabilización y liberación controlada de AE.[5] Estudios recientes indican que la microencapsulación no solo mantiene, sino que también potencia la actividad antimicrobiana de los AE. Por ejemplo, la encapsulación de aceites esenciales de limoncillo y menta ha demostrado una inhibición significativamente mayor de patógenos y biofilms.[6] Adicionalmente, la selección del material de encapsulación, como la maltodextrina o la goma arábiga, resulta determinante para maximizar la efectividad antimicrobiana de los AE encapsulados.[7]

El objetivo de esta revisión es analizar la composición química y los mecanismos antimicrobianos de los aceites esenciales, así como las técnicas de microencapsulación y su influencia en la inhibición de biofilms y patógenos. Para ello, se examinan 30 artículos seleccionados de las bases de datos PubMed y SciELO, con el fin de ofrecer una visión integral de las capacidades y aplicaciones de los AE microencapsulados en el control de infecciones microbianas.

MÉTODO

Para la elaboración de este artículo de revisión, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de la literatura en las bases de datos PubMed y SciELO. La selección de los artículos se realizó siguiendo criterios específicos de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión abarcaron artículos originales sobre la composición química y los mecanismos antimicrobianos de los aceites esenciales, estudios sobre técnicas de microencapsulación de aceites esenciales y sus beneficios en términos de estabilidad y eficacia antimicrobiana. Además, se incluyeron únicamente publicaciones de libre acceso disponibles en las bases de datos consultadas.

El proceso de búsqueda y selección se realizó utilizando palabras claves “essential oils”, “antimicrobial

activity", "biofilms", "microencapsulation", "chemical composition", y "antimicrobial mechanisms". La búsqueda se restringió a artículos publicados en los últimos diez años para asegurar la actualidad de la información.

DESARROLLO Y RESULTADOS

Se revisaron un total de 30 artículos que cumplieron con los criterios de inclusión establecidos. Los estudios seleccionados abarcan investigaciones sobre la composición química y los mecanismos antimicrobianos de los aceites esenciales, la formación y resistencia de los biofilms, y las técnicas de microencapsulación aplicadas para mejorar la estabilidad y eficacia de los aceites esenciales.

A continuación, se presenta un análisis detallado de los hallazgos más relevantes de los artículos revisados, organizados en secciones que abordan los principales temas de interés: la composición química de los aceites esenciales, sus mecanismos antimicrobianos, la formación y resistencia de los biofilms, y las técnicas y beneficios de la microencapsulación.

Composición química y mecanismos antimicrobianos de los aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) se originan en más de 17 500 especies de plantas pertenecientes a diversas familias de angiospermas —entre ellas, Lamiaceae, Rutaceae, Myrtaceae, Zingiberaceae y Asteraceae—; sin embargo, únicamente alrededor de 300 están disponibles a escala industrial.[8,9] Estos compuestos presentan un amplio espectro de propiedades biológicas, que incluyen actividad larvicida, antioxidante, fungicida, analgésica, antiinflamatoria y antitumoral.[9]

Desde el punto de vista biosintético, los AE se forman en el citoplasma y en los plastidios de las células vegetales a través de las rutas del ácido malónico, ácido mevalónico y metil-d-eritritol-4-fosfato.[10,11] Una vez sintetizados, se acumulan en estructuras especializadas como glándulas, cavidades secretoras y conductos de resina, estando presentes como gotículas en hojas, tallos, flores, frutos, corteza y raíces.[10,12] Su composición química es notablemente compleja, integrada principalmente por terpenos, terpenoides y fenilpropanoides, aunque también pueden contener ácidos grasos, óxidos y compuestos derivados del azufre.[10,11] Para su obtención, se han descrito tanto métodos avanzados de extracción —como la extracción con fluidos supercríticos, la extracción en fase líquida subcrítica y la extracción por microondas sin solventes— como métodos convencionales, entre los cuales destacan la hidrodestilación, la destilación al vapor, la hidrodifusión y la extracción con solventes.[11]

Además de los compuestos mencionados, en los AE se han identificado moléculas como ácidos, alcoholes, aldehídos, hidrocarburos alifáticos, ésteres acíclicos o lactonas, compuestos que contienen nitrógeno y azufre, cumarinas y homólogos de fenilpropanoides.[12] Físicamente, los AE son líquidos volátiles, límpidos, de diversos colores, solubles en lípidos y en disolventes orgánicos, y por lo general muestran una densidad inferior a la del agua.[13] Dentro de sus múltiples acciones biológicas, destacan sus propiedades antimicrobianas: en particular, algunos componentes fenólicos tienen la capacidad de penetrar y despolarizar la membrana citoplasmática de microorganismos. Un ejemplo relevante es el eugenol, un hidroxifenilpropeno presente de forma natural en los AE de familias como Lamiaceae, Lauraceae, Myrtaceae y Myristicaceae.[14]

Los aceites esenciales, así como sus principales componentes y la actividad se encuentran sintetizados en la tabla 1.

Tabla 1. Aceites esenciales con actividad antimicrobiana

Aceites esenciales	Componentes	Actividad
Orégano Origanum vulgare	Carvacrol, timol, α-terpineno, γ -terpineno, terpinen-4-ol, p-cimeno, α-terpineol y sabineno	Antioxidante, antifúngica y antibacteriana.
Menta *Mentha spp*	Mentol, mentona, limoneno, isomentona, acetato de mentilo, carvona, ß-pineno, 1,8-cineol, pulegona, óxido de piperitona y miceno.	Antioxidante, antifúngica y antibacteriana.
Albahaca *Ocimum Basilicum*	Ácido fenólico y los derivados terpenoides incluyen el metil eugenol (42,58 %) seguido del cariofileno (26,88 %) y el eugenol.	Antioxidante, antifúngica y antibacteriana.
Romero *Rosmarinus officinalis*	Compuestos fenólicos volatiles (1,8-cineol, alcanfor y α-pineno	Antibacteriana y Antifúngica.
Hierba Luisa *Cymbopogon citratus*	E-citral, Z-citral, beta-mirceno, selina-6-en-4-ol y cis-ocimeno	Antibacteriana y Antifúngica.
Timo *Thymus musili*	Carvacrol, cinnamaldehyde, thymol, geraniol, and eugenol salicylaldehyde, geraniol, citral, perillaldehyde and methyl chavicol	Antibacteriana y Antifúngica.

Eneldo *Anethum graveolens*	Limoneno (48,05 %), carvona (37,94 %), cis-dihidrocarvona (3,5 %) y trans-carvona.	Antibacteriana y Antifúngica.	
Lavanda *Lavanda angustifolia*	1,8-cineol (eucaliptol), ocimeno, ocimeno(1,5–6,0),linalool(25,0–38,0),alcanfor, terpina -1-en-4-ol ,α-terpineol, acetato de linalilo y acetato de lavandulilo	Antibacterianas y Antifúngicas	

Biofilms: formación, estructura y resistencia a los antimicrobianos

Las biopelículas constituyen una forma de crecimiento microbiano multicelular con amplia relevancia clínica, dado que se estima que más del 65 % de las infecciones nosocomiales y hasta el 80 % de las infecciones microbianas en general están relacionadas con su formación.[12] Estas estructuras pueden desarrollarse sobre superficies bióticas (tejidos) o abióticas (dispositivos médicos, tuberías de agua, entre otras) y están integradas principalmente por bacterias o levaduras que se adhieren y producen una matriz extracelular de proteínas, polisacáridos y ADN, también conocida como sustancia polimérica extracelular.[15,16,17,18,19,20,21,22]

La biogénesis de las biopelículas se compone de varias etapas. Inicialmente, los microorganismos se adhieren de manera reversible a una superficie, mediada en parte por interacciones fisicoquímicas y, posteriormente, se vuelven irreversiblemente unidos mediante la producción y secreción de componentes de la matriz.[22,23] A medida que la biopelícula madura, los microorganismos forman microcolonias y establecen redes de canales acuosos para la distribución de nutrientes y la eliminación de productos de desecho.[22,24] Este proceso se regula, en gran medida, a través de la comunicación intercelular (quorum sensing), que coordina la expresión génica y determina características fenotípicas específicas, incluidas las asociadas con la resistencia a antimicrobianos.[22,25]

Una de las propiedades más destacadas de las biopelículas es su alta tolerancia a los tratamientos antimicrobianos. Esta resistencia multifactorial se explica por:

- Protección física de la matriz: la densa estructura polimérica dificulta la penetración de antibióticos y agentes desinfectantes hasta las células más profundas.
- Cambios fenotípicos de las células: las bacterias y levaduras en biopelícula pueden expresar genes de resistencia específicos y presentar tasas de crecimiento más lentas, lo que reduce la efectividad de ciertos fármacos dirigidos a procesos de división celular.[21,23]
- Células persistentes: dentro de la comunidad pueden surgir subpoblaciones de "células persistentes" capaces de tolerar concentraciones elevadas de antibióticos sin presentar resistencia genética clásica, dificultando aún más la erradicación completa.[22,24]
- Transferencia horizontal de genes: el ambiente confinado de las biopelículas facilita el intercambio de plásmidos y elementos genéticos móviles, incrementando la diseminación de genes de resistencia.[23]

En el ámbito hospitalario, esta tolerancia a los agentes antimicrobianos se traduce en un incremento significativo del fracaso terapéutico, particularmente en las infecciones asociadas a dispositivos médicos como catéteres, prótesis articulares y válvulas cardíacas.[21,24] En muchos casos, la única estrategia efectiva para el control de la infección consiste en el retiro del dispositivo infectado o, en situaciones más extremas, la resección del tejido afectado.[21]

Dada la prevalencia y la relevancia clínica de las biopelículas, la búsqueda de nuevas estrategias para su prevención y tratamiento representa un desafío urgente en salud pública. Investigaciones recientes abarcan enfoques que van desde la modificación de superficies de dispositivos médicos hasta la aplicación de moléculas disruptoras de la matriz y la combinación de terapias antimicrobianas convencionales con tecnologías emergentes, como la nanotecnología o la liberación controlada de fármacos.[25,26,27] Estas aproximaciones innovadoras buscan contrarrestar la complejidad de los mecanismos de resistencia de las biopelículas y, con ello, mejorar la eficacia de los tratamientos antimicrobianos.

Técnicas de microencapsulación y sus beneficios

La microencapsulación se ha convertido en una de las estrategias más versátiles e innovadoras para proteger y liberar de manera controlada sustancias bioactivas en diversos campos industriales, incluyendo la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética y agroquímica.[28] Su relevancia radica en la capacidad de conservar la estabilidad de compuestos sensibles, enmascarar sabores y olores indeseados, y garantizar la liberación de dichos compuestos en el momento y lugar óptimos para su máxima eficacia.

En términos generales, la microencapsulación consiste en envolver partículas sólidas, líquidas o incluso gaseosas (de tamaños habitualmente comprendidos entre 1 y 1 000 micras) con una cubierta o membrana protectora. Esta cubierta puede ser de naturaleza polimérica o lipídica y, dependiendo de la técnica empleada, se obtiene mediante procesos físicos, químicos o físico-químicos.[29] Entre las técnicas más comunes, se incluyen el secado por atomización, la coacervación (simple y compleja), la polimerización interfacial, la encapsulación en liposomas y los recubrimientos en lecho fluidizado.

El secado por atomización (spray drying) ha sido ampliamente adoptado en la industria alimentaria

y farmacéutica debido a su escalabilidad y bajo costo relativo. Básicamente, se parte de una emulsión o suspensión que contiene el material activo y un agente encapsulante, la cual se pulveriza y expone a una corriente de aire caliente para eliminar el solvente. Con esto se forman micropartículas sólidas que protegen y retienen el principio activo.[30] No obstante, existe el riesgo de que ciertos compuestos sensibles al calor se vean afectados, por lo que es fundamental controlar rigurosamente los parámetros de operación.

Otra técnica relevante es la coacervación, que puede ser simple o compleja. La coacervación simple se basa en la desolvación de un polímero (por ejemplo, gelatina) a través de cambios en pH, fuerza iónica o temperatura. Este fenómeno conlleva la formación de gotas de polímero (coacervado) que envuelven el material activo. En la coacervación compleja, por su parte, dos polímeros con cargas opuestas (por ejemplo, gelatina y goma arábiga) forman un complejo que precipita y rodea la sustancia a encapsular.[31] Aunque esta metodología ofrece buena reproducibilidad y permite controlar la morfología de la cápsula, exige un ajuste cuidadoso de las condiciones del medio, lo cual a veces dificulta la escalabilidad.

En cuanto a la polimerización interfacial, esta técnica se caracteriza por la reacción entre monómeros solubles en aceite y otros solubles en agua, generando un polímero en la interfaz de dos fases inmiscibles. Debido a su alta eficiencia para encapsular sustancias hidrofóbicas y a la resistencia mecánica de las cápsulas resultantes, se emplea con frecuencia para compuestos como pesticidas o colorantes. Sin embargo, implica el uso de reactivos potencialmente tóxicos y exige la eliminación de subproductos de la reacción, lo que puede incrementar los costos y dificultar la aceptación regulatoria.[32]

Por otro lado, el recubrimiento en lecho fluidizado consiste en hacer circular partículas sólidas en un flujo ascendente de gas, mientras se rocían con una solución o emulsión que, al evaporarse el disolvente, genera capas protectoras alrededor de las partículas. Esta técnica, muy empleada en el sector farmacéutico para producir formas de dosificación sólidas con liberación controlada, ofrece la ventaja de un control preciso del grosor de la capa. Sin embargo, requiere equipamientos específicos y la optimización de numerosos parámetros (temperatura, velocidad del aire, viscosidad de la solución) para obtener cápsulas uniformes.[33]

Asimismo, la encapsulación en liposomas representa uno de los métodos más extendidos en la formulación de fármacos y productos cosméticos. Los liposomas son vesículas formadas por una o varias bicapas fosfolipídicas, que imitan la estructura de las membranas celulares. Gracias a esta similitud, ofrecen una excelente biocompatibilidad y la posibilidad de encapsular tanto principios activos hidrofílicos como lipofílicos.[34] No obstante, su producción a gran escala y la estabilidad a largo plazo siguen siendo factores limitantes.

Los beneficios derivados de la microencapsulación son vastos y abarcan desde la mejora en la estabilidad de los compuestos sensibles a factores ambientales (luz, oxígeno, humedad, pH) hasta la liberación controlada o dirigida, lo que permite optimizar la eficacia del producto y reducir dosis y efectos secundarios, particularmente en el ámbito farmacéutico.[35] En el sector alimentario, el enmascaramiento de olores o sabores desagradables y la conservación de nutrientes durante el almacenamiento y la digestión constituyen ventajas evidentes. Por su parte, la industria agroquímica aprovecha la microencapsulación para liberar pesticidas y fertilizantes de forma escalonada, minimizando el impacto ambiental y el riesgo de toxicidad aguda.

Pese a sus beneficios, existen desafíos que impulsan la investigación en el área. Entre los más destacados se encuentra la necesidad de desarrollar sistemas de liberación aún más específicos y sensibles a estímulos (como cambios de pH, temperatura o presencia de enzimas), de manera que la liberación del compuesto activo responda puntualmente a requerimientos biológicos o ambientales.[36] Además, los costos de producción y la disponibilidad de materiales encapsulantes inocuos y ecológicos son temas de creciente relevancia, especialmente ante un entorno regulatorio cada vez más estricto.

En conclusión, la microencapsulación se erige como una herramienta esencial para el desarrollo de productos con propiedades tecnológicas y funcionales mejoradas. Cada técnica, desde el secado por atomización hasta la encapsulación en liposomas, ofrece soluciones específicas a distintos problemas de estabilidad y liberación de sustancias activas. Mirando hacia el futuro, es previsible que la integración de enfoques biotecnológicos, la nanoencapsulación y la fabricación aditiva (por ejemplo, impresión 3D) refuercen su aplicación en áreas emergentes, posicionando a la microencapsulación como un pilar fundamental en la innovación de productos con alto valor agregado.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sugieren que la utilización de aceites esenciales (AE) con actividad antimicrobiana, combinada con técnicas de microencapsulación, representa un enfoque prometedor para enfrentar retos asociados a la inestabilidad de los compuestos naturales y la resistencia microbiana, particularmente en el contexto de las biopelículas. El análisis de 30 artículos, seleccionados bajo criterios estrictos de inclusión y exclusión, pone de manifiesto tanto la diversidad en la composición química de los AE como la complejidad de sus mecanismos de acción.[8,9] En este sentido, la presencia de terpenos, fenoles y demás compuestos bioactivos confiere a los AE un amplio espectro antimicrobiano, con efectos demostrados frente a bacterias y hongos, además de un potencial para modular procesos como la formación y resistencia de

los biofilms.[10,11]

Pese a la diversidad química de los AE, la revisión resalta que su eficacia antimicrobiana puede verse limitada por factores de degradación, volatilidad y sensibilidad a condiciones ambientales (pH, temperatura, luz y presencia de oxígeno).[12,13] Esta inestabilidad constituye uno de los principales desafíos para su aplicación a gran escala, especialmente en áreas como la industria farmacéutica y alimentaria, donde la formulación de los productos finales debe garantizar la conservación de la actividad antimicrobiana durante el proceso de almacenamiento y distribución.[3,14] Es en este punto donde la microencapsulación se erige como una estrategia innovadora, al permitir la protección de los AE frente a condiciones adversas, prolongando su vida útil y facilitando su liberación controlada.[28,29]

La revisión de la literatura confirma la efectividad de múltiples métodos de microencapsulación, entre los cuales destacan el secado por atomización, la coacervación (simple y compleja), la polimerización interfacial, el recubrimiento en lecho fluidizado y la encapsulación en liposomas.[30,34] Estas técnicas ofrecen la posibilidad de ajustar variables de proceso —como temperatura, pH y concentración de agentes encapsulantes— para obtener partículas con características morfológicas y fisicoquímicas específicas. Sin embargo, resulta evidente que cada método conlleva ventajas y limitaciones que deben sopesarse según la aplicación deseada. Por ejemplo, el secado por atomización presenta gran escalabilidad y bajo costo relativo, pero puede ocasionar pérdidas en la actividad biológica de AE sensibles al calor.[30] Por su parte, la polimerización interfacial logra cápsulas de alta resistencia mecánica, aunque requiere el uso de reactivos potencialmente tóxicos y una exhaustiva purificación.[32]

La aplicación de AE microencapsulados como estrategia antimicrobiana cobra especial relevancia en el control y prevención de biofilms, estructuras que han demostrado elevada resistencia a tratamientos convencionales.[21,22] La capacidad de los AE y, en particular, de ciertos componentes fenólicos como el eugenol, para desestabilizar membranas microbianas o interferir en rutas metabólicas esenciales, podría mejorar el control de las biopelículas, sobre todo si los compuestos se liberan de forma localizada y sostenida.[13,25] Así, la microencapsulación podría potenciar la penetración de los AE en la matriz extracelular de los biofilms, al mantener una concentración efectiva de los principios activos durante un periodo prolongado. No obstante, existen aún pocos estudios que exploren de manera sistemática la eficacia de los AE microencapsulados en sistemas de biofilms complejos, lo que representa un área de oportunidad en la investigación futura.

Por otro lado, la selección de materiales encapsulantes ecológicos y biocompatibles cobra cada vez más importancia ante un panorama regulatorio más exigente.[36] Polímeros naturales y biodegradables, como alginatos, quitosano y proteínas, han mostrado compatibilidad con el encapsulamiento de AE, disminuyendo la toxicidad y favoreciendo su posible aplicación en la industria alimentaria y cosmética.[31] Además, los avances en nanoencapsulación, la optimización de procesos de liberación controlada y el uso de tecnologías emergentes como la impresión 3D, podrían ofrecer soluciones de alta precisión para el suministro de AE en contextos clínicos, industriales y agroalimentarios.[35]

Finalmente, es fundamental destacar que la evidencia disponible, aunque prometedora, proviene en gran medida de estudios in vitro o a pequeña escala. Para validar la aplicación industrial y clínica de los AE microencapsulados, se requieren ensayos clínicos y pruebas piloto que contemplen la complejidad de los procesos productivos, la estabilidad del producto durante el almacenamiento y la regulación específica de cada sector.[36] La colaboración multidisciplinaria —entre químicos, farmacéuticos, microbiólogos, ingenieros de procesos y profesionales de la salud— resultará esencial para diseñar y evaluar formulaciones con alto potencial de transferencia al mercado.

En síntesis, la microencapsulación de los aceites esenciales surge como un enfoque integral que aborda simultáneamente la protección de compuestos bioactivos, la liberación dirigida y el aumento de la eficacia antimicrobiana. Los resultados revisados respaldan la hipótesis de que esta combinación puede representar un avance significativo frente a la creciente problemática de la resistencia microbiana y la inestabilidad de los AE. No obstante, quedan abiertas numerosas líneas de investigación enfocadas en la optimización de los métodos de encapsulación, la comprensión detallada de los mecanismos de acción contra biofilms y el establecimiento de parámetros industriales escalables que promuevan el uso de este tipo de productos de manera segura y eficiente.

CONCLUSIONES

La evidencia recopilada en esta revisión pone de manifiesto el notable potencial de los aceites esenciales como agentes antimicrobianos, así como la relevancia de la microencapsulación para maximizar su eficacia y estabilidad. Por un lado, la diversidad de compuestos bioactivos presentes en los aceites esenciales brinda un espectro de acción amplio y versátil contra múltiples microorganismos, incluidos aquellos que forman biopelículas altamente resistentes. Por otro lado, las diversas técnicas de microencapsulación permiten proteger dichos compuestos de la degradación y liberarlos de manera controlada, favoreciendo la sostenibilidad de su actividad biológica.

Pese a los avances alcanzados, persisten desafíos en cuanto a la optimización de metodologías de encapsulación, la búsqueda de materiales amigables con el medioambiente y la evaluación de la eficacia de estos sistemas en contextos reales. Asimismo, se requiere profundizar en estudios que aborden la interacción con biofilmes complejos y explorar enfoques multidisciplinarios que integren la ingeniería de procesos, la biología molecular y la nanotecnología para potenciar los resultados.

En conjunto, los hallazgos resaltan la importancia de continuar investigando la sinergia entre aceites esenciales y estrategias de microencapsulación, tanto para afianzar su aplicabilidad en las industrias alimentaria y farmacéutica, como para enfrentar desafíos emergentes de salud pública relacionados con la resistencia antimicrobiana. De mantenerse los esfuerzos de investigación y desarrollo en este ámbito, es previsible que la microencapsulación de aceites esenciales se consolide como una herramienta clave en la formulación de productos más efectivos y seguros en un futuro próximo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bakkali F, Averbeck S, Averbeck D, Idaomar M. Biological effects of essential oils – A review. Food Chem Toxicol. 2008;46(2):446–475.

2. Römling U, Balsalobre C. Biofilm infections, their resilience to therapy and innovative treatment strategies. J Intern Med. 2012;272(6):541–561.

3. Romero-Montero A, Melgoza-Ramírez LJ, Ruíz-Aguirre JA, Chávez-Santoscoy A, Magaña JJ, Cortés H, et al. Essential-Oils-Loaded Biopolymeric Nanoparticles as Strategies for Microbial and Biofilm Control: A Current Status. Int J Mol Sci. 2024;25(1).

4. de Jesus Freitas T, Assunção LS, de Lima Silva V, Oliveira TS, Conceição ISR, Machado BAS, et al. Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs. Recent Pat Nanotechnol. 2021;16(3):219-234.

5. Sousa VI, Parente JF, Marques JF, Forte MA, Tavares CJ. Microencapsulation of Essential Oils: A Review. Polymers. 2022;14(9):1937.

6. de Melo AM, Barbi RCT, Almeida FLC, de Souza WFC, Cavalcante AM, de M de Souza HJB, et al. Effect of Microencapsulation on Chemical Composition and Antimicrobial, Antioxidant, and Cytotoxic Properties of Lemongrass (Cymbopogon flexuosus) Essential Oil. Food Technol Biotechnol. 2022;60(3):359-371.

7. Chmiel M, Drzymała G, Bocianowski J, Komnenić A, Baran A, Synowiec A. Maltodextrin-Coated Peppermint and Caraway Essential Oils: Effects on Soil Microbiota. Plants. 2022;11(23):3147.

8. Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils – A review. Food and Chemical Toxicology, 46(2), 446–475. https://doi.org/10.1016/J.FCT.2007.09.106

9. Wińska, K., Mączka, W., Łyczko, J., Grabarczyk, M., Czubaszek, A., & Szumny, A. (2019). Essential oils as antimicrobial agents—myth or real alternative? In Molecules (Vol. 24, Issue 11). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/molecules24112130

10. Stringaro, A., Colone, M., & Angiolella, L. (2018). Antioxidant, Antifungal, Antibiofilm, and Cytotoxic Activities of Mentha spp. Essential Oils. Medicines, 5(4), 112. https://doi.org/10.3390/medicines5040112

11. Waseem, R., & Low, K. H. (2015). Advanced analytical techniques for the extraction and characterization of plant-derived essential oils by gas chromatography with mass spectrometry. In Journal of Separation Science (Vol. 38, Issue 3, pp. 483–501). Wiley-VCH Verlag. https://doi.org/10.1002/jssc.201400724

12. Nazzaro, F., Fratianni, F., De Martino, L., Coppola, R., & De Feo, V. (2013). Effect of essential oils on pathogenic bacteria. In Pharmaceuticals (Vol. 6, Issue 12, pp. 1451–1474). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ph6121451

13. Marchese, A., Barbieri, R., Coppo, E., Orhan, I. E., Daglia, M., Nabavi, S. F., Izadi, M., Abdollahi, M., Nabavi, S. M., & Ajami, M. (2017). Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint. In Critical Reviews in Microbiology (Vol. 43, Issue 6, pp. 668–689). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1295225

14. Tardugno, R., Serio, A., Pellati, F., D'Amato, S., Chaves López, C., Bellardi, M. G., Di Vito, M., Savini, V., Paparella, A., & Benvenuti, S. (2019). Lavandula x intermedia and Lavandula angustifolia essential oils: phytochemical composition and antimicrobial activity against foodborne pathogens. Natural Product Research, 33(22), 3330–3335. https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1475377

15. De Martino, L., De Feo, V., & Nazzaro, F. (2009). Chemical composition and in vitro antimicrobial and mutagenic activities of seven lamiaceae essential oils. Molecules, 14(10), 4213–4230. https://doi.org/10.3390/molecules14104213

16. Lagha, R., Abdallah, F. Ben, AL-Sarhan, B. O., & Al-Sodany, Y. (2019). Antibacterial and Biofilm Inhibitory Activity of Medicinal Plant Essential Oils Against Escherichia coli Isolated from UTI Patients. Molecules, 24(6). https://doi.org/10.3390/molecules24061161

17. Romero-Montero, A., Melgoza-Ramírez, L. J., Ruíz-Aguirre, J. A., Chávez-Santoscoy, A., Magaña, J. J., Cortés, H., Leyva-Gómez, G., & Del Prado-Audelo, M. L. (2024). Essential-Oils-Loaded Biopolymeric Nanoparticles as Strategies for Microbial and Biofilm Control: A Current Status. In International Journal of Molecular Sciences (Vol. 25, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/ijms25010082

18. Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A., & Liang, L. (2016). Microencapsulation of Oils: A Comprehensive Review of Benefits, Techniques, and Applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15(1), 143–182. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179

19. de Jesus Freitas, T., Assunção, L. S., de Lima Silva, V., Oliveira, T. S., Conceição, I. S. R., Machado, B. A. S., Nunes, I. L., Otero, D. M., & Ribeiro, C. D. F. (2021). Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs. Recent Patents on Nanotechnology, 16(3), 219–234. https://doi.org/10.2174/1872210515666210422123001

20. Li, M., Guo, Q., Lin, Y., Bao, H., & Miao, S. (2023). Recent Progress in Microencapsulation of Active Peptides—Wall Material, Preparation, and Application: A Review. In Foods (Vol. 12, Issue 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/foods12040896

21. da Silva Acácio, R., Pamphile-Adrian, A. J., Florez-Rodriguez, P. P., de Freitas, J. D., Goulart, H. F., & Santana, A. E. G. (2023). Dataset of Schinus terebinthifolius essential oil microencapsulated by spray-drying. Data in Brief, 47. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108927

22. Asha C, Usha R, Kumar SR, Rajesh T. Synthesis, characterization and antibiotic capabilities of microspheres loaded with essential oils. Indian J Nat Prod Resour. 2023;14(1).

23. Bouaouina S, Aouf A, Touati A, Ali H, Elkhadragy M, Yehia H, et al. Effect of Nanoencapsulation on the Antimicrobial and Antibiofilm Activities of Algerian Origanum glandulosum Desf. against Multidrug-Resistant Clinical Isolates. Nanomaterials. 2022;12(15).

24. Cao C, Xie P, Zhou Y, Guo J. Characterization, Thermal Stability and Antimicrobial Evaluation of the Inclusion Complex of Litsea cubeba Essential Oil in Large-Ring Cyclodextrins (CD9–CD22). Foods. 2023;12(10).

25. Phanse SK, Sawant S, Singh H, Chandra S. Physico-Chemical and Antimicrobial Efficacy of Encapsulated Dhavana Oil: Evaluation of Release and Stability Profile from Base Matrices. Molecules. 2022;27(22).

26. Sánchez-Osorno DM, López-Jaramillo MC, Caicedo Paz AV, Villa AL, Peresin MS, Martínez-Galán JP. Recent Advances in the Microencapsulation of Essential Oils, Lipids, and Compound Lipids through Spray Drying: A Review. Vol. 15, Pharmaceutics. 2023.

27. Berraaouan D, Essifi K, Addi M, Hano C, Fauconnier ML, Tahani A. Hybrid Microcapsules for Encapsulation and Controlled Release of Rosemary Essential Oil. Polymers (Basel). 2023;15(4).

28. Truong CBH, Nguyen TKH, Tran TTT, Nguyen TNL, Mai HC. Microencapsulation of corn mint (Mentha arvensis L.) essential oil using spray-drying technology. Food Res. 2022;6(4).

29. Kazlauskaite JA, Matulyte I, Marksa M, Bernatoniene J. Nutmeg Essential Oil, Red Clover, and Liquorice

Extracts Microencapsulation Method Selection for the Release of Active Compounds from Gel Tablets of Different Bases. Pharmaceutics. 2023;15(3).

30. Chmiel M, Drzymała G, Bocianowski J, Komnenić A, Baran A, Synowiec A. Maltodextrin-Coated Peppermint and Caraway Essential Oils Effects on Soil Microbiota. Plants. 2022;11(23).

31. de Melo AM, Barbi RCT, Almeida FLC, de Souza WFC, Cavalcante AM de M, de Souza HJB, et al. Effect of Microencapsulation on Chemical Composition and Antimicrobial, Antioxidant and Cytotoxic Properties of Lemongrass (Cymbopogon flexuosus) Essential Oil. Food Technol Biotechnol. 2022;60(3).

32. Ahmad MR, Ahmad K. Antimicrobial properties of some plant essential oils against two human pathogens. International Journal of Pharmaceutical Chemistry and Analysis. 2023;9(4).

33. Montesinos L, Baró A, Gascón B, Montesinos E. Bactericidal and plant defense elicitation activities of Eucalyptus oil decrease the severity of infections by Xylella fastidiosa on almond plants. Front Plant Sci. 2023;14.

34. El Abdali Y, Beniaich G, Mahraz AM, El Moussaoui A, Bin Jardan YA, Akhazzane M, et al. Antibacterial, Antioxidant, and in silico NADPH Oxidase Inhibition Studies of Essential Oils of Lavandula dentata against Foodborne Pathogens. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine. 2023;2023.

35. Gheorghita D, Robu A, Antoniac A, Antoniac I, Ditu LM, Raiciu AD, et al. In Vitro Antibacterial Activity of Some Plant Essential Oils against Four Different Microbial Strains. Applied Sciences (Switzerland). 2022;12(19).

36. Phanse SK, Sawant S, Singh H, Chandra S. Physico-Chemical and Antimicrobial Efficacy of Encapsulated Dhavana Oil: Evaluation of Release and Stability Profile from Base Matrices. Molecules. 2022;27(22).

FINANCIACIÓN

Se recibió financiación de la Dirección de Investigación y Desarrollo DIDE, de la Universidad Técnica de Ambato, bajo el proyecto de investigación titulado: evaluación de la actividad antimicrobiana y antibiofilm de aceites esenciales microencapsulados, aprobado por Resolución Nro. UTA-CONIN-2024-0025-R

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección de Investigación y Desarrollo DIDE, de la Universidad Técnica de Ambato.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Elizabeth Proaño-Pérez, Mario Vilcacundo, Víctor Hernán Guangasig Toapanta, Alberto Bustillos.

Adquisición de fondos: Elizabeth Proaño-Pérez, Alberto Bustillos.

Investigación: Elizabeth Proaño-Pérez, Mario Vilcacundo, Víctor Hernán Guangasig Toapanta, Alberto Bustillos.

Metodología: Elizabeth Proaño-Pérez, Mario Vilcacundo, Víctor Hernán Guangasig Toapanta, Alberto Bustillos.

Administración del proyecto: Alberto Bustillos.

Recursos: Elizabeth Proaño-Pérez, Alberto Bustillos.

Redacción – borrador original: Elizabeth Proaño-Pérez, Mario Vilcacundo, Víctor Hernán Guangasig Toapanta, Alberto Bustillos.

Redacción – revisión y edición: Elizabeth Proaño-Pérez, Mario Vilcacundo, Víctor Hernán Guangasig Toapanta, Alberto Bustillos.