BIOMEDICA

Recibido 07 Sep. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 23 Sep. 2025

Nanoemulsiones: Definición, métodos de síntesis, caracterización y aplicaciones biomédicas

Nanoemulsions: Definition, synthesis methods, characterisation and biomedical applications

Abraham Gabriel Alvarado Mendoza[1*]
gabriel.alvarado@academicos.udg.mx
Valeria Sánchez González[2]
valeria.sanchez5825@alumnos.udg.mx
Rosaura Hernández Montelongo[3]
rosaura.hernandez@academicos.udg.mx
Alejandra Cruz Hernández[4]
alejandra.cruz@academicos.udg.mx

[1] Universidad de Guadalajara
[2] Maestría en Ciencias en Química
[3] Departamento de Bioingeniería Traslacional, CUCEI, Universidad de Guadalajara.
[4] Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

Resumen: Las nanoemulsiones representan una plataforma emergente en la administración controlada de fármacos debido a su capacidad para transportar y liberar compuestos bioactivos, mejorar su biodisponibilidad y permitir una liberación sostenida en el sitio de acción. Su tamaño nanométrico y alta estabilidad cinética facilitan la penetración en tejidos biológicos y la protección de moléculas terapéuticas frente a la degradación enzimática. En el campo biomédico, estas nanoestructuras han mostrado gran potencial en la administración de agentes hidrofóbicos y terapias combinadas. La creciente evidencia científica respalda su potencial para revolucionar la administración farmacéutica, aunque aún persisten barreras clave para su aplicación clínica masiva. Este trabajo es un breve resumen donde se presenta una descripción de las nanoemulsiones, los métodos de síntesis más empleados y las técnicas de caracterización. Finalmente, se muestran una de sus múltiples aplicaciones, la liberación controlada de fármacos.

Palabras clave: Nanoemulsiones ,Aplicaciones Biomédicas , Métodos de síntesis, Métodos de alta energía, Métodos de baja energía

ABSTRACT

Nanoemulsions represent an emerging platform in controlled drug delivery due to their ability to transport and release bioactive compounds, improve their bioavailability, and enable sustained release at the site of action. Their nanometric size and high kinetic stability facilitate penetration into biological tissues and protect therapeutic molecules from enzymatic degradation. In the biomedical field, these nanostructures have shown great potential in the administration of hydrophobic agents and combination therapies. Growing scientific evidence supports their potential to revolutionise pharmaceutical delivery, although key barriers to their widespread clinical application remain. This paper is a brief summary presenting a description of nanoemulsions, the most commonly used synthesis methods and characterisation techniques. Finally, one of their many applications, controlled drug release, is demonstrated.

Keywords: Nanoemulsions, Biomedical Applications, synthesis methods, High energy methods, Low energy methods

Introducción

La administración eficiente de medicamentos sigue siendo uno de los principales desafíos en biomedicina, particularmente en el tratamiento de enfermedades crónicas que requieren terapias prolongadas. En los últimos años, las nanoemulsiones (NE) se han destacado como una estrategia innovadora para mejorar la solubilidad, estabilidad y biodisponibilidad de fármacos insolubles en agua, al permitir un control preciso de su liberación en el organismo (Chatzidaki & Mitsou, 2025a; Chavhan, 2025; Liu et al., 2024; More et al., 2025; Preeti et al., 2023a) .

En general, una emulsión es una dispersión coloidal compuestas por dos fases, la fase dispersa y la fase continua, esta última es aquella que se encuentra en mayor proporción y en aplicaciones biomédicas casi siempre es agua, mientras que la fase dispersa es una sustancia hidrofóbica como fármacos, aceites, lípidos entre otros. La fase dispersa se encuentra distribuida a lo largo de la fase continua en forma de pequeñas gotas; puesto que son de naturaleza opuesta tienden a separarse con el paso del tiempo, debido a esto se adiciona un agente tensoactivo, el cual es una molécula anfifílica, es decir, en su estructura tiene una parte polar que se une al agua y una no polar que tiene tendencia a unirse a la fase dispersa hidrofóbica con el objetivo de mantener la emulsión estable (es decir, sin separación entre sus fases) (Ravera et al., 2021). Además, si se reduce el tamaño de las gotas de la sustancia hidrofóbica la emulsión permanecerá estable por más tiempo. Es así como surgieron las NE, las cuales son emulsiones con un tamaño de gota entre 20 y 200 nm, aunque algunos autores sugieren que debe ser menor a 100 nm (Gupta et al., 2016). Las NE son sistemas termodinámicamente inestables, translúcidas o transparentes y presentan alta estabilidad cinética gracias al tamaño de sus gotas, lo que reduce el riesgo de separación de fases y garantiza una dispersión homogénea del sistema. Este comportamiento favorece una disponibilidad sostenida del principio activo y disminuye el uso de tensoactivos en exceso en comparación con emulsiones clásicas. De esta manera, las NEs se posicionan como una plataforma versátil para administración oral, tópica, parental o intranasal en terapias farmacéuticas modernas (Al-mohammedawi & Mollenhauer, 2022a; Pandey et al., 2020).

Las NE pueden clasificarse según la naturaleza de la fase continua, si la fase oleosa se encuentra en menor proporción dispersa en una fase acuosa, se les conoce como NE directas y se representan como (O/W) (Figura 1), cuando la fase continua está compuesta por una sustancia hidrofóbica entonces se les conoce como NE inversas y se les representa por (W/O) (Dhaval et al.,

2022) ejemplos cotidianos son la mayonesa y cremas solares entre otras.Las emulsiones bicontinuas son termodinámicamente estables y las dos fases coexisten de manera interconectadas en lugar de un líquido disperso en otro.

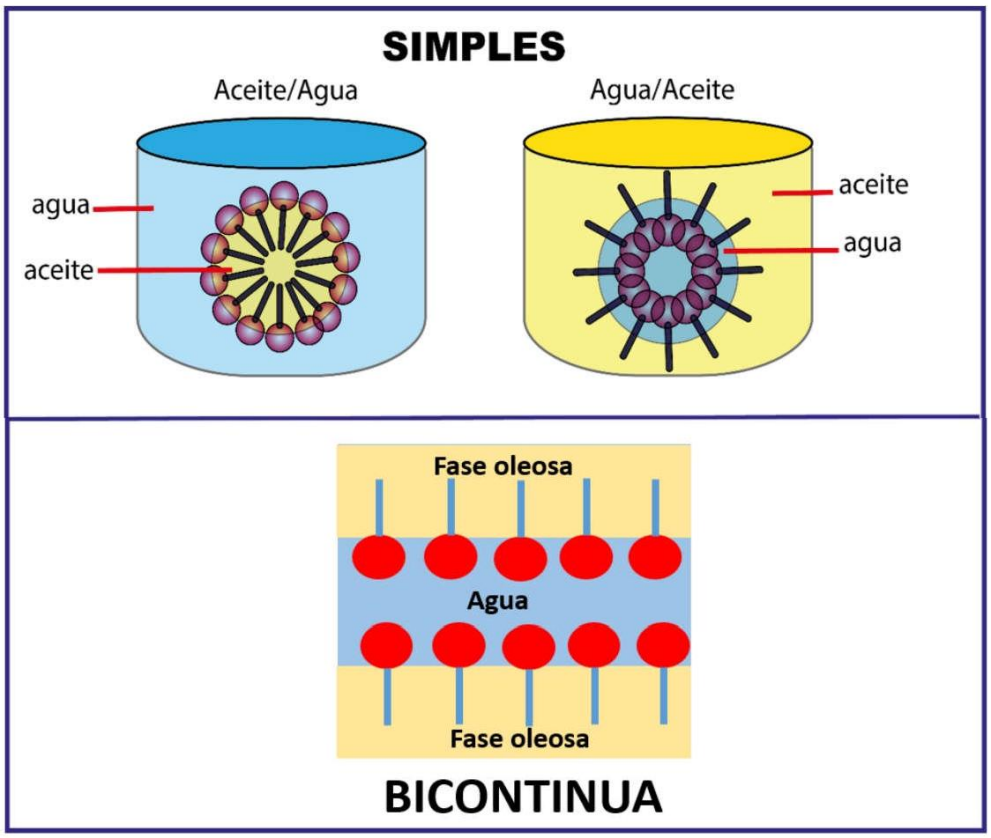

Figura 1. Tipos de nanoemulsiones directas (O/W) e inversas (W/O).

Dentro de los componentes de una NE, el agente tensoactivo o simplemente tensoactivo juega un rol fundamental, ya que es el responsable de reducir la tensión interfacial casi a cero entre la fase acuosa y la fase dispersa permitiendo una buena solubilización. Como se mencionó anteriormente, los tensoactivos en su estructura molecular tiene una parte hidrofilica, lo que los hace solubles en agua y una parte hidrofóbica lo que les da afinidad a sustancias hidrofóbicas (Kumar Shah et al., 2022). La elección adecuada del tensoactivo se basa en su balance hidrofílico-lipofílico (HBL), este representa la preferencia del tensoactivo a participar en emulsiones directas o inversas y se encuentran tabulados para la mayoría de los tensoactivos comerciales, este valor debe ser óptimo para estabilizar el tipo de emulsión deseada. Este equilibrio resulta crítico, ya que facilita la formación de una película interfacial flexible y estable, reduciendo la coalescencia y mejorando la dispersión durante el proceso de síntesis (Chatzidaki & Mitsou, 2025a; Jacob et al., 2024a).

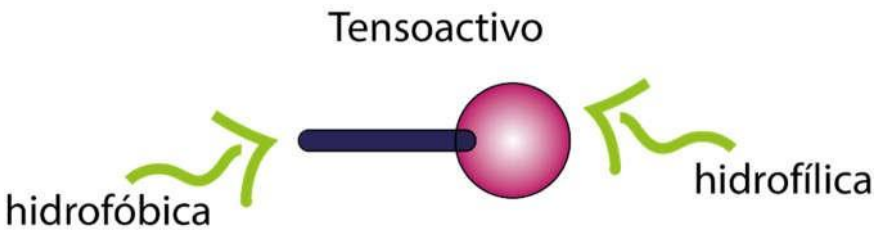

Figura 2. Estructura de una molécula de agente tensoactivo, la parte hidrofílica se le conoce como cabeza y la parte hidrofóbica como cola.

Los tensoactivos se clasifican según el tipo de carga que se encuentra en la cabeza o parte hidrofilica (Figura 3) cuando estos se encuentran disueltos en un medio acuoso, con base en eso, tenemos tensoactivos iónicos los cuales se dividen en aniónicos y catiónicos; los primeros presentan una carga negativa en el grupo polar mientras que los catiónicos tienen una carga positiva. Los tensoactivos no iónicos, son aquellos que no presentan una carga neta en el grupo polar y, finalmente, los anfóteros, su carga depende del pH del medio en el cual se encuentren por lo que pueden poseer carga positiva o negativa según el medio(Al-mohammedawi & Mollenhauer, 2022b; Nakama, 2017) .

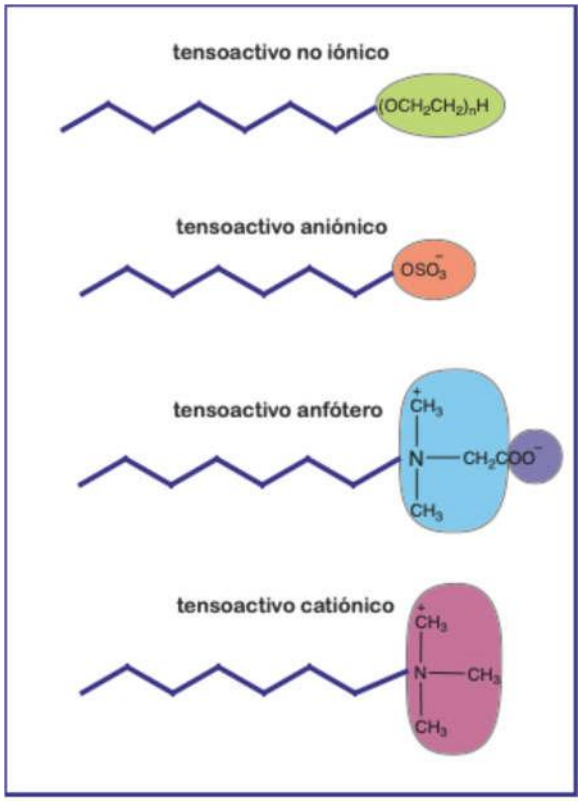

Figura 3. Clasificación de los agentes tensoactivos según la carga presente en el grupo polar cuando estos están disueltos en medio acuoso.

Métodos de síntesis de nanoemulsiones

En general, se requieren de dos pasos para obtener NE, en el primero se forma una emulsión convencional con tamaños de gota mayores a la micra, en el segundo el tamaño de gota se reduce

a menos de 200 nm. Para ello pueden seguirse dos tipos de métodos principalmente, los métodos de *alta energía* y *baja energía* (Figura 4). En los primeros se aprovecha la energía que adicionan al sistemas dispositivos o equipos especializados como homogenizadores de alta velocidad, microfluidizadores (equipos de alta presión) o equipos de ultrasonido para romper las gotas grandes de emulsión y formar las pequeñas gotas de la NE. Por otro lado, en los métodos de baja energía se realizan cambios súbitos en variables como la temperatura o concentración del sistema favoreciendo la emulsificación.

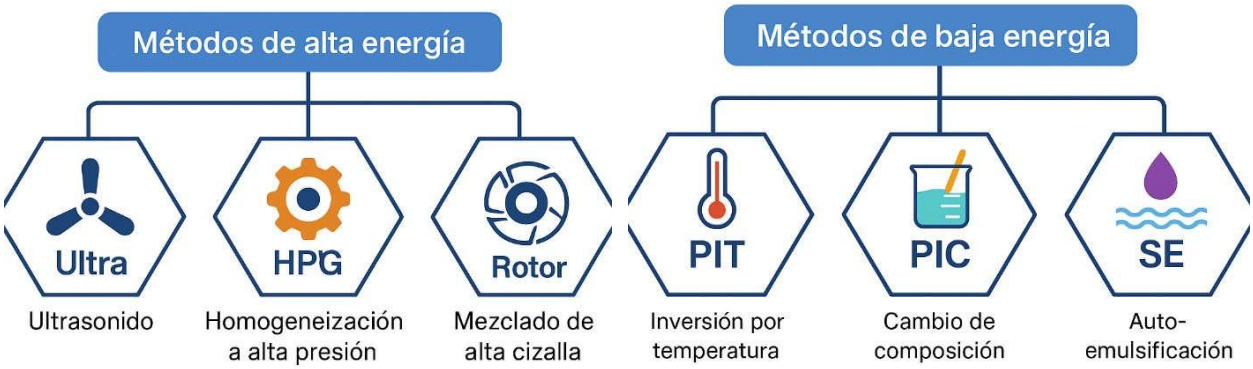

Figura 4. Métodos de síntesis de nanoemulsiones.

Métodos de alta energía:

Al utilizar los métodos de alta energía se puede lograr mayor control sobre el tamaño de gota, debido a que este es una función directa de la cantidad de energía suministrada al sistema, el número de pasos o el tiempo de exposición (Jacob et al., 2024b; Naseema et al., 2021).

Homogenización de alta presión (HPH)

Es el método más utilizado para producir NE. Esencialmente, las gotas de emulsión son forzadas a pasar a través de canales con diámetros de unos cuantos nanómetros (Figura 5) con lo cual las gotas grandes se rompen debido al cizallamiento hidráulico y alta turbulencia, generando gotas más pequeñas. El tamaño de partícula final depende del número de veces que se hace pasar a la emulsión a través de estos canales (número de pasos) y al diferencial de presión al cual es sometida la emulsión usualmente de 500 a 5000 psi (Azmi et al., 2019; Choradiya & Patil, 2021).

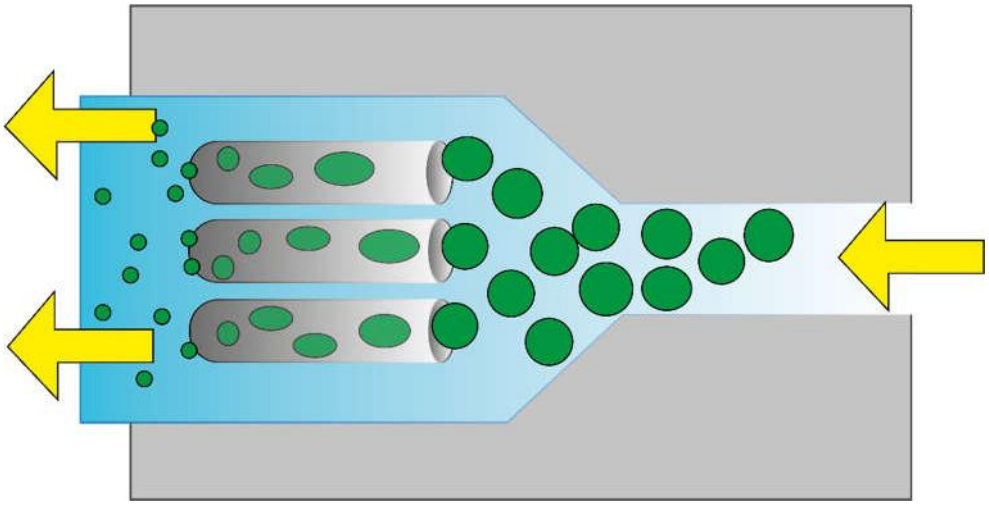

Figura 5. Ejemplo de la cámara de una microfluidizador.

Emulsificación ultrasónica

En el caso del uso de ultrasonido es un método muy utilizado para producir NE a pequeña escala, una sonda ultrasónica se introduce en la emulsión (Figura 6), la cual emite ondas ultrasónicas de 20 kHz a 100 MHz hacia las gotas de emulsión. El principio físico es utilizar las ondas y fuerzas de cavitación acústica, lo que provoca que las gotas de emulsión implosionen generando gotas pequeñas, en general, el tamaño de las NE dependerá de la frecuencia, potencia del equipo, tiempo de exposición y los componentes del sistema (Jacob et al., 2024b; Naseema et al., 2021).

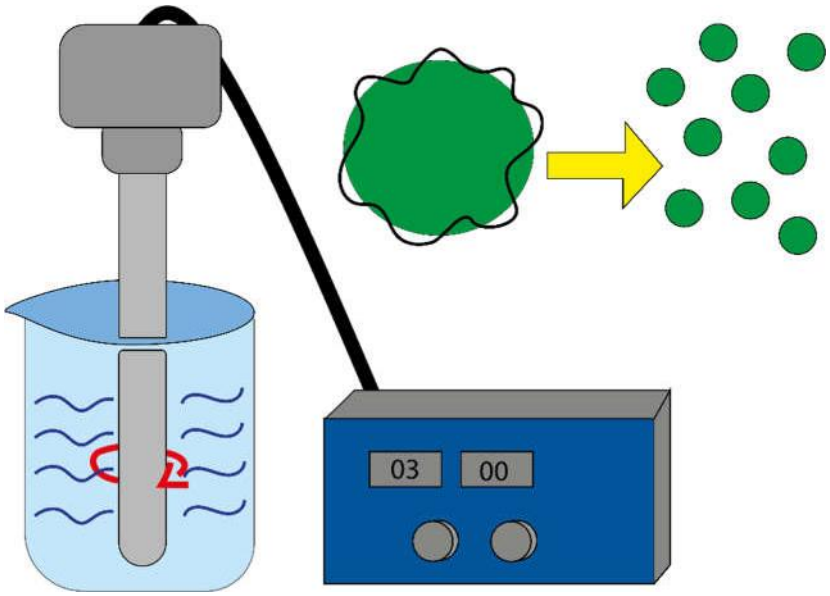

Figura 6. Ejemplo de la formación de nanoemulsiones mediante ultrasonido.

Mezclado de alta cizalla

Es un método que consiste en un rotor que gira a gran velocidad en un estator estacionario. Al girar, la emulsión se atrae directamente en la parte de arriba y será expulsada a través del estator estacionario a alta velocidad, el tamaño disminuye a medida que se agite la emulsión con mayor velocidad. Aquí las fuerzas de cizallamiento entre las gotas de la emulsión es lo que genera su

rompimiento (Azmi et al., 2019). Actualmente, este método ha adquirido gran interés a escala industrial y sobre todo en procesos continuos donde se evitan los tiempos muertos que se presentan en la producción por lotes de los otros métodos.

Métodos de baja energía:

Los métodos de baja energía se basan en fenómenos de autoensamblaje espontáneo inducidos por cambios de temperatura, composición, fuerza iónica, presión o pH. Entre los más conocidos se encuentran el método de inversión de fases por cambio en la temperatura (PIT, de sus siglas en inglés Phase Inversion Temperature**)** y el método de inversión de fase por cambio en la composición (PIC, Phase Inversion Composition). Estos procedimientos requieren menor energía y son útiles para encapsular compuestos termosensibles (Busmann et al., 2020; Cholakova et al., 2022). Al igual que en los métodos de alta energía las NE se obtienen en dos pasos. Se parte de una emulsión y se somete a un cambio súbito en las variables antes mencionadas para la formación espontánea de las NE.

Método de inversión de fases por cambio en la temperatura

Este método aprovecha el comportamiento térmico de los tensoactivos no iónicos de tipo polietoxilado, cuyo valor de HLB se ve afectado en gran medida por la temperatura: a baja temperatura son más hidrofílicos, y a alta temperatura se vuelven lipofílicos. Afectando la curvatura espontánea de la monocapa interfacial, generando NE directas (O/W) a baja temperatura o, inversas (W/O) a altas temperaturas y una fase bicontinua en el punto intermedio, alcanzando el equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLB) (Azmi et al., 2019; Choradiya & Patil, 2021). En este método se parte de una emulsión de composición constante y posteriormente se somete a un calentamiento hasta alcanzar la temperatura HLB, en la cual se forma una fase bicontinua, si se hace descender súbitamente la temperatura se favorece la emuslificacion de pequeñas gotas de la fase hidrofóbica, entre mayor sea la disminución de temperatura menor será el tamaño de gota (Figura 7). Una gran ventaja de esta técnica consiste en que el tamaño de gota que se obtiene es bastante uniforme.

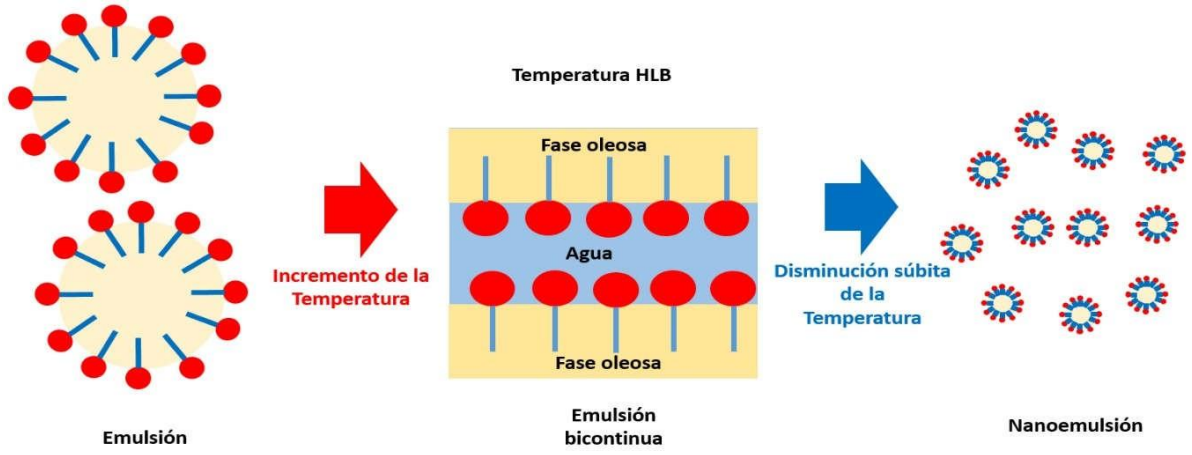

Figura 7. Formación de nanoemulsiones mediante la técnica PIT.

Método de Inversión de fases por cambio en la composición

Este método implica el cambio de una emulsión del tipo O/W a W/O o viceversa. En la mayoría de los casos se parte de una emulsión inversa, que contiene a la fase hidrofóbica/tensoactivo y un

poco de agua, posteriormente, se adiciona lentamente una mayor cantidad de agua a una temperatura constante lo que genera una emulsión bicontinua, si se continúa adicionando agua al sistema este se invierte de manera espontánea formando una NE directa (Figura 8) (Azmi et al., 2019; Naseema et al., 2021).

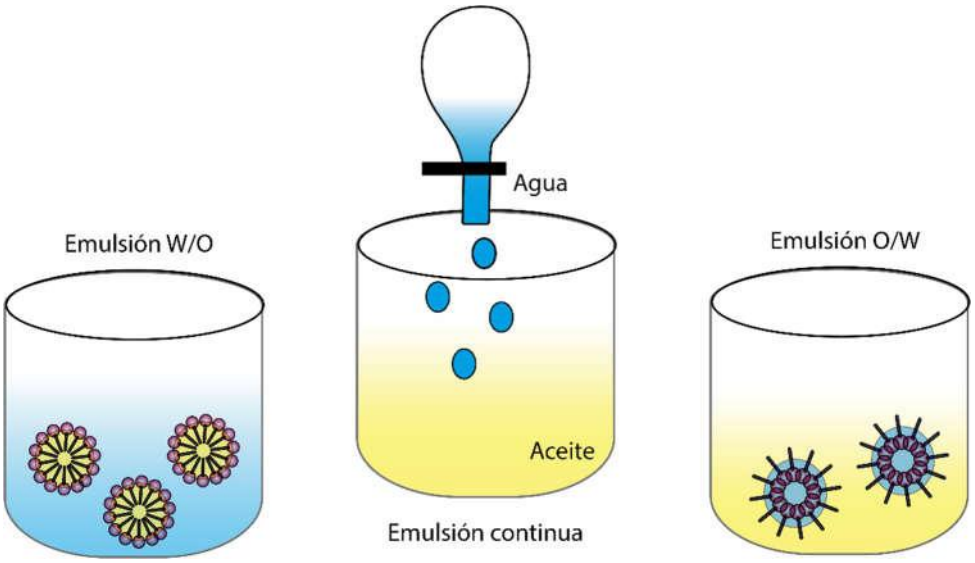

Figura 8. Formación de nanoemulsiones mediante la técnica PIC.

Emulsión espontánea

Este método se desarrolla a temperatura ambiente y sin necesidad de un equipo especial. Actualmente, no se lleva a cabo a nivel industrial, esta limitado a una baja concentración de fase hidrofóbica y depende de la zona de transición de fase, concentración y tensión interfacial. Básicamente, consiste en mezclar una solución de fase hidrofóbica y tensoactivo con una disolución acuosa de cotensoactivos, la alta afinidad del tensoactivo por el monómero o el agua induce turbulencia en ambas fases, porovocando la ruptura de gotas. Para obtener NE, es importante activar la turbulencia interfacial mediante cotensoactivos, estos son sustancias como alcoholes de 6 a 8 carbonos, acetona o alcanos, a diferencia de los tensoactivos los cotensoactivos no forman estructuras micelares, sus moléculas se ubican entre las moléculas del tensoactivo para evitar la difusión de la fase hidrofóbica (Choradiya & Patil, 2021; Preeti et al., 2023b).

Caracterización de nanoemulsiones

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica permite evaluar tamaño, distribución y morfología de las nanopartículas. Durante la preparación de la muestra, el secado puede provocar encogimiento y alteraciones estructurales. Además, las muestras no conductoras, tienden a acumular carga bajo el haz de electrones, distorsionando las imágenes; por lo que, se aplica un recubrimiento conductor ultradelgado (oro) (Preeti et al., 2023b). En un SEM, se utiliza un conjunto de lentes electromagnéticos para concentrar un haz de electrones sobre la superficie de la muestra, ajustando el enfoque mediante la variación de la corriente eléctrica aplicada en las bobinas que generan el campo magnético (Zhou et al., 2007). Un conjunto de bobinas de escaneo desplaza el haz de electrones enfocado sobre la muestra en un patrón de barrido (raster), mientras se recopilan diversas

señales (electrones secundarios, retrodispersados y rayos X característicos) para generar contraste y formar una imagen (Figura 9) (Yablon & Libera, 2019).

Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Es una de las técnicas más adecuadas y ampliamente utilizadas para caracterizar nanoemulsiones, ofreciendo una resolución a nivel atómico (~ 10 nm) y una visualización de su estructura. Una muestra ultrafina es irradiada con un haz de electrones (Figura 10), cuyas interacciones con la muestra generan electrones transmitidos, dispersados, difractados y en mucho menor medida secundarios. El TEM permite determinar con precisión la morfología, tamaño y estructura de las partículas de NE. Si bien genera imágenes bidimensionales, la tomografía electrónica posibilita reconstrucciones tridimensionales de las muestras (Agrawal et al., 2024). La técnica por análisis de TEM es considerada una técnica absoluta para medir el tamaño y su distribución asi como la morfología de las partículas puesto que pues ver completamente las mismas. Sin embargo, el TEM tiene los mismos problemas que un ojo humano, por ejemplo, miopía y astigmatismo, por lo que es necesario un mantenimiento preventivo frecuente para tener un equipo en óptimas condiciones.

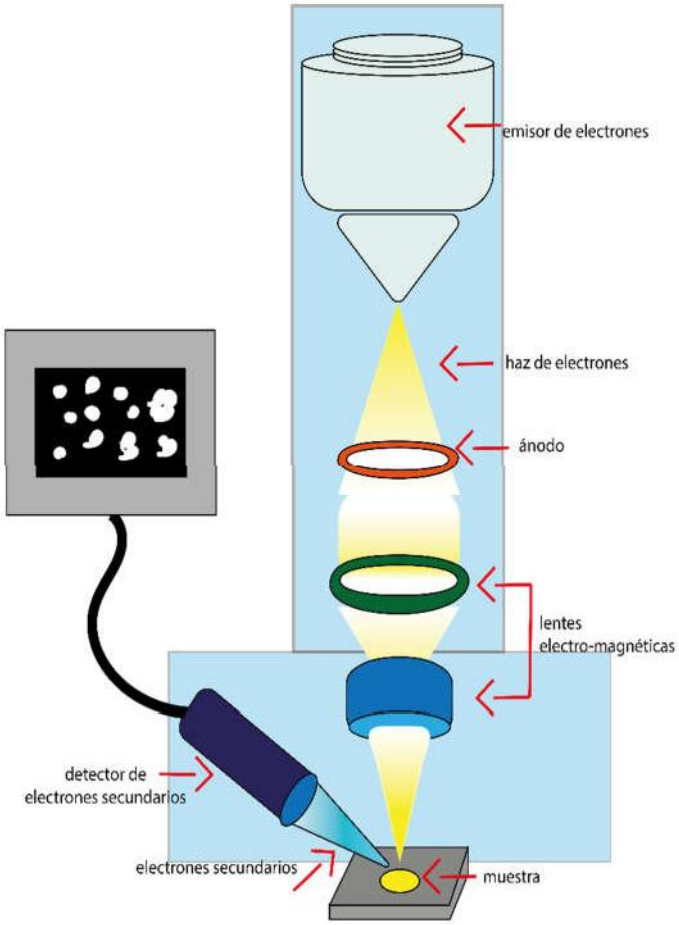

Figura 9. Esquema del microscopio electrónico de barrido (SEM).

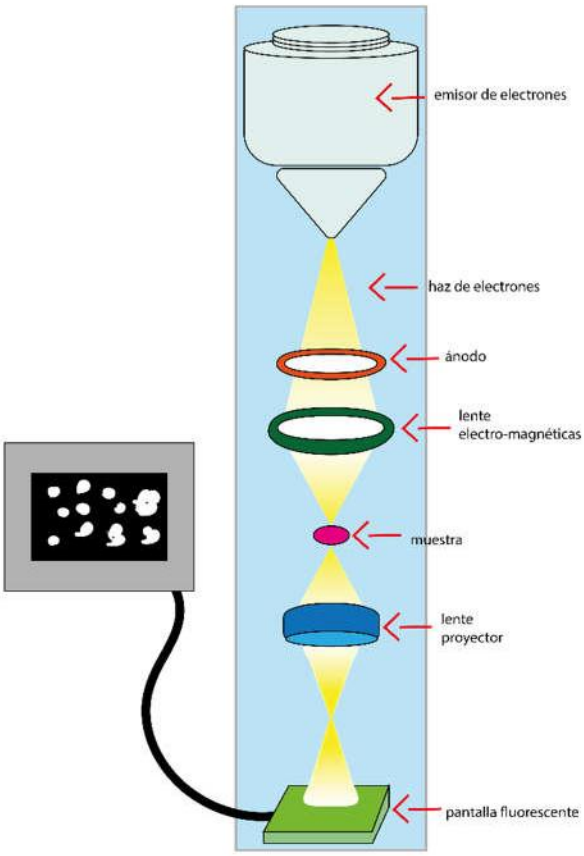

Figura 10. Esquema del microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Dispersión dinámica de luz (DLS)

Esta es una técnica rápida no invasiva ampliamente utilizada para determinar el tamaño promedio y la distribución de partículas en sistemas coloidales, como las NE. Cuando un haz de láser como fuente de luz impacta sobre la muestra (0) las partículas dispersan la luz en diferentes direcciones, un detector registra la variación en la intensidad de la luz dispersada en función del tiempo (se mueven más rápido si son más pequeñas y viceversa). El análisis matemático permite estimar el diámetro hidrodinámico y, en algunos casos, el índice de polidispersidad (es decir, que tan homogéneas en tamaño son). Su precisión puede verse afectada por alta polidispersidad o agregación (Rodriguez-Loya et al., 2023). Las muestras a analizar deberán ser diluidas lo suficiente para evitar el fenómeno de redispersion y aunque es una técnica relativa suele ser bastante útil y con buena precisión.

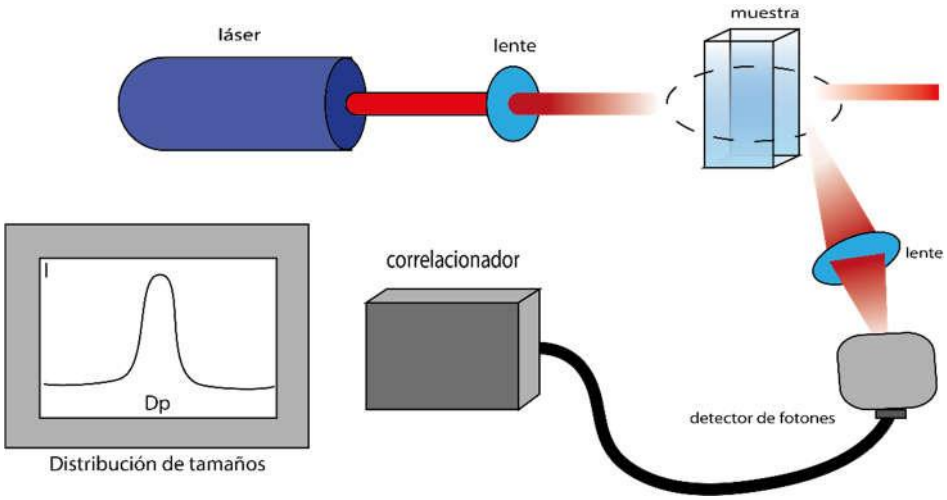

Figura 11. Esquema del funcionamiento del dispersor de luz dinámica.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica termoanalítica empleada para medir la cantidad de calor que una muestra absorbe o libera mientras se somete a una variación controlada de temperatura. En este método, se utiliza una referencia, la cual consiste en una capsula vacía. La capsula de la muestra y la referencia se colocan en una cámara bajo atmosfera inerte sobre discos termoeléctricos, conectados a un sistema de flujo de calor, lo que permite transferir de forma controlada la energía térmica desde el calefactor hasta las celdas como se muestra en la Figura 12 (Bogaert et al., 2004). Esta técnica proporciona información detallada sobre transiciones térmicas, tales como puntos de fusión, cristalización, transiciones vítreas y procesos de degradación. En el caso de las NE, el DSC puede emplearse para evaluar su estabilidad térmica, ya que cualquier cambio en la estructura molecular del sistema puede reflejarse como una señal en el termograma (KV et al., 2014). Es una técnica económica no invasiva que permite obtener información de la estabilidad y pureza de materiales, cuando un fármaco se introduce sobre las gotas de NE puede ser confirmado por esta técnica con buena precisión.

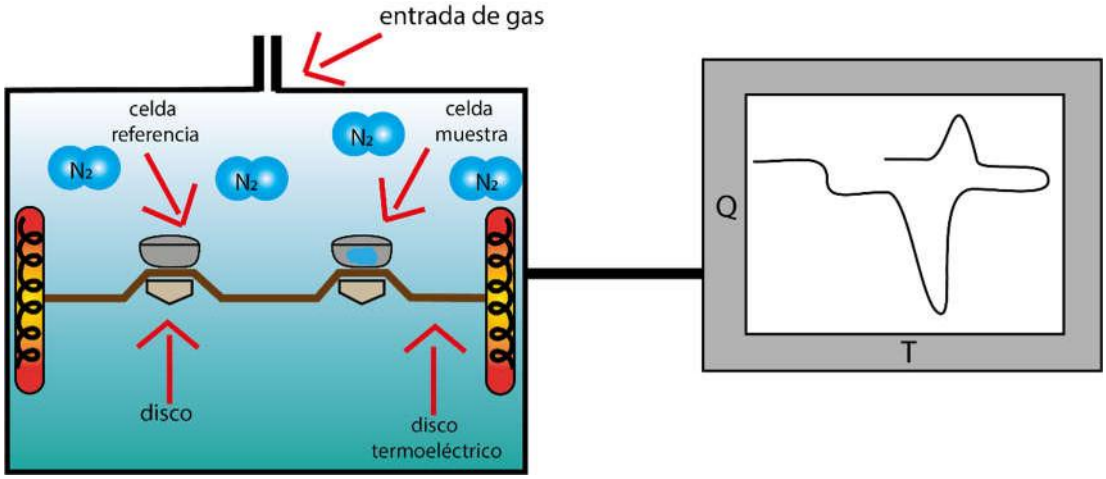

Figura 12. Esquema del calorímetro diferencial de barrido.

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica que mide las frecuencias de luz infrarroja absorbidas por una muestra. Utiliza un interferómetro de Michelson, donde un haz de infrarrojo se divide (Figura 13) y genera un interferograma. Esto se convierte en un espectro de absorción por medio de una transformada de Fourier (Johnson et al., 1992). Cada enlace químico absorbe radiación a frecuencias específicas, generando un espectro ("huella digital"). Esta técnica resulta muy útil para confirmar la presencia de grupos funcionales y para detectar cambios en la estructura química de las NE; después de procesos de encapsulación o liberación controlada (Johnson et al., 1992; Preeti et al., 2023b). Es una técnica económica, no invasiva y puede aplicarse a muestras solidas y liquidas. Además, puede llevarse a cabo de distintas formas, como son en forma de películas o pastillas.

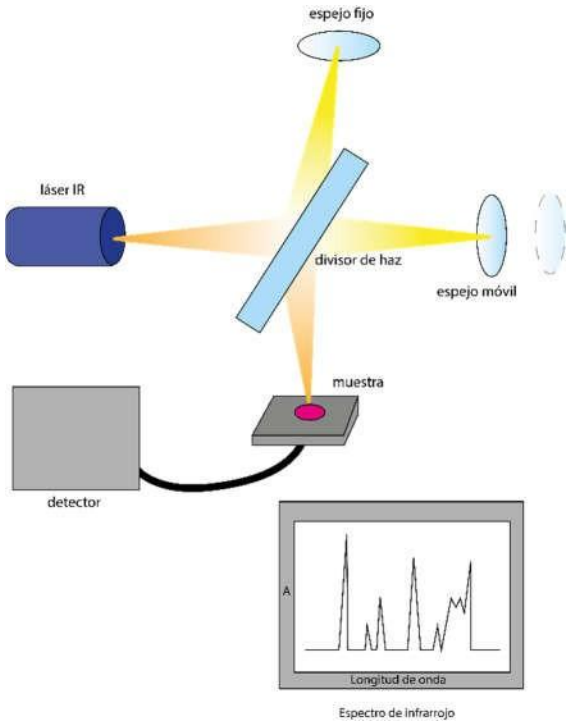

Figura 13. Esquema del espectrofotómetro de Infrarrojo.

Aplicaciones de nanoemulsiones en la liberación de fármacos

Actualmente, las NE se están aplicando en diversas áreas, por ejemplo, en la industria de polímeros actúan como plantillas para la síntesis de partículas poliméricas aplicadas en adhesivos, barnices, pinturas entre otras. En la industria de alimentos se emplean como medios de transporte para saborizantes y otras sustancias, se emplean también en la agricultura como transporte de sustancias activas como fertilizantes y pesticidas entre otras. Sin embargo, la aplicación más trascendente ha sido como sistemas de liberación de fármacos. El comportamiento de las NE para que sean eficaces en sistemas biológicos depende de factores fisicoquímicos como el tamaño, la superficie, el tensoactivo empleado y el solvente. El primero de ellos es crítico, ya que partículas de ~50nm muestran mayor captación celular (Wilson et al., 2022). Las nanoemulsiones pueden administrarse por diversas vías, tópica, intravenosa, oral, ocular, intramuscular, intranasal.

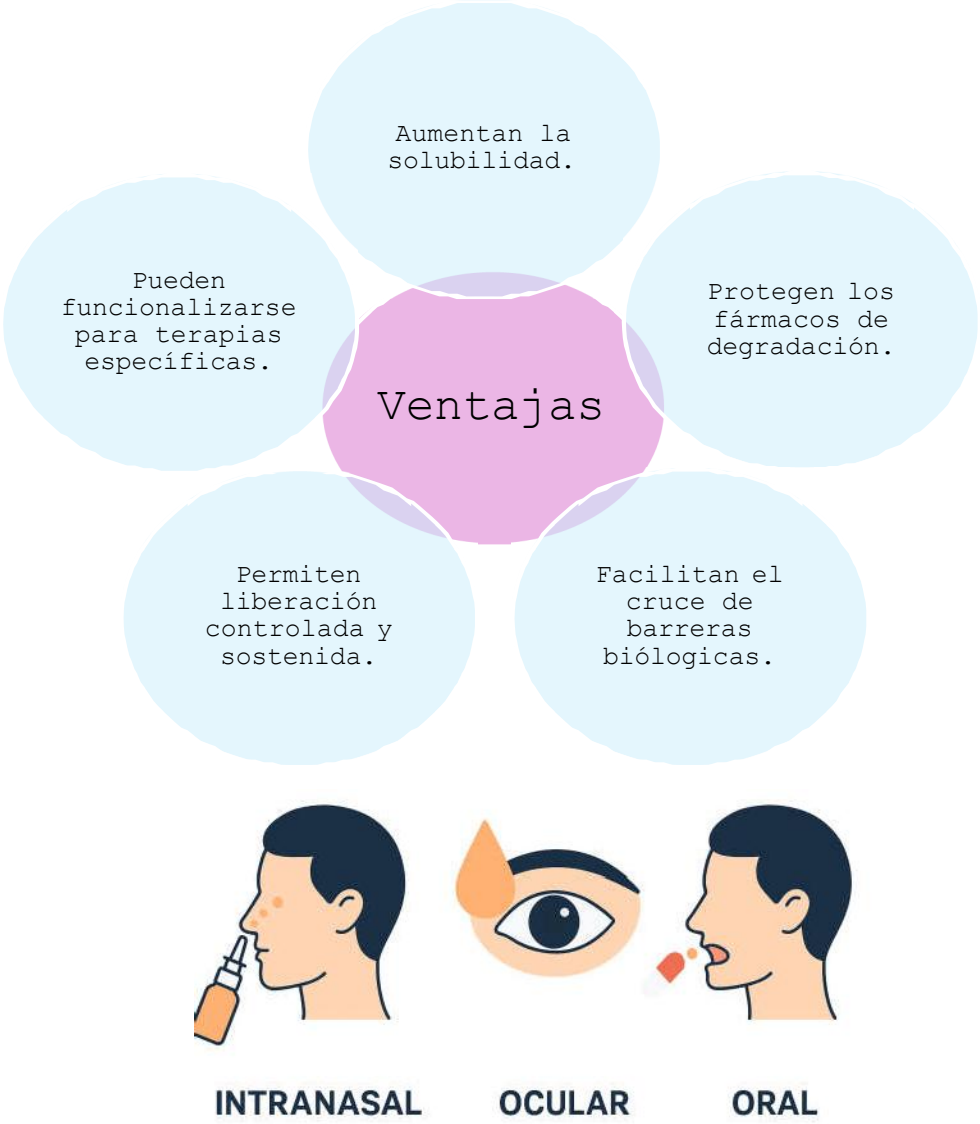

Figura 14. Tipos de aplicaciones de las NE en la liberación de fármacos.

Administración vía oral

A pesar de los múltiples desafíos inherentes al tracto gastrointestinal (TGI), tales como la degradación enzimática, el pH y la limitada permeabilidad intestinal, las NE han emergido como una estrategia prometedora para la administración oral de compuestos bioactivos. No obstante, el perfil toxicológico de estás formulaciones, influenciado por el contenido de tensoactivos, requiere de una evaluación cuidadosa para garantizar la seguridad y biocompatibilidad del sistema (Chatzidaki & Mitsou, 2025a). Las NE han demostrado ser sistemas eficaces para mejorar la biodisponibilidad oral de diversos fármacos, como Candesartán Cilexetil (formulado con Tween® 80/Solutol® HS-15 en fase oleosa de Capryol™ PGMC), mostrando una biodisponibilidad 10 veces mayor que su formulación convencional; el Paclitaxel (con aceite de triglicéridos de cadena media y tensoactivos Labrasol®/TPGS), alcanzando un 70% de biodisponibilidad oral y el ibuprofeno (en aceite de oliva con sucroésteres) duplicando su biodisponibilidad (Vitória Minzoni de Souza Iacia et al., 2024).

El uso de curcumina y emodina para el tratamiento de la enfermedad inflamatoria intestinal es prometedor debido a los efectos de reparación de la mucosa antiinflamatoria e intestinal. Las nanoemulsiones fueron cargadas con quitosana y alginato de sodio, mostraron estabilidad en el líquido gástrico simulado y colapsando en el líquido colónico simulado, en conclusión, pueden desintegrarse en el colón mejorando el microambiente inflamatorio del colón (Lei et al., 2023).

Administración vía ocular

El ojo humano es todo un desafío para la administración de medicamentos debido a las barreras oculares presentes. El reto hoy en día es cambiar la perspectiva científica para superar cada barrera ocular; barreras estáticas, dinámicas y metabólicas dependiendo el entorno. Para la obtención de excipientes que nos ayuden a penetrar esas barreras, se debe tomar en cuenta un medicamento que sea lipofílico, la formulación final deber isotónica con pH cercano a los fluidos fisiológicos (Suri et al., 2020). Se debe garantizar la compatibilidad farmacéutica e interacción efectiva con la película lagrimal. Los tensoactivos en las NE reducen el ángulo de contacto entre la gota y la córnea, mejorando la retención ocular. Un ejemplo, son los tensoactivos catiónicos, los cuales logran mayor adhesión (Chatzidaki & Mitsou, 2025b; Singh et al., 2020).

Las NE oftálmicas con tamaño de gota $\leq$200 nm mejoran la permeación corneal, facilitando el acceso al abrir uniones estrechas entre células epiteliales. Presentan carga superficial positiva, lo que prolonga la retención en la mucina ocular por interacciones electrostáticas, y su capacidad de gelificación rápida, aumentando la resistencia al drenaje lagrimal (Chatzidaki & Mitsou, 2025b).

Administración vía intranasal

Actualmente, la entrega de medicamentos intranasales ha demostrado ser una vía eficaz para la administración de las formas de dosificación. Siendo la mucosa nasal una vía terapéuticamente idónea para eludir las barreras que impiden la entrega directa de fármacos en el sitio exacto. La región olfativa de las mucosas nasales sirve como un vínculo directo entre la nariz y el cerebro, como la enfermedad de Alzheimer, la migraña, la depresión, la esquizofrenia, la enfermedad de Parkinson y la meningitis se tratan con NE cargadas con medicamentos (Preeti et al., 2023b).

Las NE mejoran significativamente la administración nasal de fármacos debido a su pequeño tamaño y su composición lipídica, lo que le permite interactuar con las membranas celulares y facilitar el transporte transcelular. Su naturaleza modificable favorece una mayor adhesión a la mucosa nasal y una liberación sostenida del fármaco, prolongando su tiempo de residencia hasta 12-16 h, en contraste con las formulaciones convencionales que son eliminadas en apenas 4 h. Estudios demuestran que el tamaño óptimo de partícula (80-200 nm) no solo mejora la absorción del fármaco, sino que también optimiza su distribución en la cavidad nasal, reduciendo la frecuencia de dosificación requerida. Estas características hacen de las NE un sistema prometedor para la administración nasal de medicamentos, combinando mayor eficacia terapéutica con una posología más conveniente para los pacientes (Abdulla et al., 2021).

Conclusiones

El uso de nanoemulsiones en diversas áreas ya está completamente desarrollado y algunos métodos de síntesis se llevan a cabo a nivel industrial, actualmente, se trabaja en mejorar y eficientar estos procesos de obtención y, en buscar escalar a nivel industrial otros procesos. También, se busca mejorar los tipos de tensoactivos empleados para hacerlos biodegradables, con menor impacto ambiental y, en ciertos casos que sean compatibles con el cuerpo humano casi en du totalidad. Sin lugar a dudas desde principios de su formulación (década de los 80) hasta la fecha siguen siendo un campo de estudio de gran interés y que promete seguir brindando oportunidades en muchas áreas.

Referencias

Abdulla, N. A., Balata, G. F., El-ghamry, H. A., & Gomaa, E. (2021). Intranasal delivery of Clozapine using nanoemulsion-based in-situ gels: An approach for bioavailability enhancement. *Saudi Pharmaceutical Journal*, *29*(12), 1466–1485. https://doi.org/10.1016/J.JSPS.2021.11.006

Agrawal, M., Prasad, V. V. S. H., Nijhawan, G., Jalal, S. S., Rajalakshmi, B., & Dwivedi, S. P. (2024). A Comprehensive Review of Electron Microscopy in Materials Science: Technological Advances and Applications. *E3S Web of Conferences*, *505*. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202450501029

Al-mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022a). Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. In *Materials* (Vol. 15, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/ma15062026

Al-mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022b). Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. *Materials 2022, Vol. 15, Page 2026*, *15*(6), 2026. https://doi.org/10.3390/MA15062026

Azmi, N. A. N., Elgharbawy, A. A. M., Motlagh, S. R., Samsudin, N., & Salleh, H. M. (2019). Nanoemulsions: Factory for Food, Pharmaceutical and Cosmetics. *Processes 2019, Vol. 7, Page 617*, *7*(9), 617. https://doi.org/10.3390/PR7090617

Bogaert, G. A., Goeman, L., Ridder, D. De, Wevers, M., Ivens, J., & Schuermans, A. (2004). The physical and antimicrobial effects of microwave heating and alcohol immersion on catheters that are reused for clean intermittent catheterisation. *European Urology*, *46*(5), 641–646. https://doi.org/10.1016/J.EURURO.2004.06.016

Busmann, E. F., Martínez, D. G., Lucas, H., & Mäder, K. (2020). Phase inversion-based nanoemulsions of medium chain triglyceride as potential drug delivery system for parenteral applications. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, *11*, 213–224. https://doi.org/10.3762/BJNANO.11.16

Chatzidaki, M. D., & Mitsou, E. (2025a). Advancements in Nanoemulsion-Based Drug Delivery Across Different Administration Routes. In *Pharmaceutics* (Vol. 17, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030337

Chatzidaki, M. D., & Mitsou, E. (2025b). Advancements in Nanoemulsion-Based Drug Delivery Across Different Administration Routes. *Pharmaceutics 2025, Vol. 17, Page 337*, *17*(3), 337. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS17030337

Chavhan, R. (2025). Nanosuspensions: Enhancing drug bioavailability through nanonization. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, *83*(2), 251–271. https://doi.org/10.1016/J.PHARMA.2024.06.003

Cholakova, D., Vinarov, Z., Tcholakova, S., & Denkov, N. (2022). Self-emulsification in chemical and pharmaceutical technologies. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, *59*. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101576

Choradiya, B. R., & Patil, S. B. (2021). A comprehensive review on nanoemulsion as an ophthalmic drug delivery system. *Journal of Molecular Liquids*, *339*, 116751. https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.116751

Dhaval, M., Vaghela, P., Patel, K., Sojitra, K., Patel, M., Patel, S., Dudhat, K., Shah, S., Manek, R., & Parmar, R. (2022). Lipid-based emulsion drug delivery systems — a comprehensive review. *Drug Delivery and Translational Research*, *12*(7), 1616–1639. https://doi.org/10.1007/S13346-021-01071-9/TABLES/4

Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., & Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: formation, properties and applications. *Soft Matter*, *12*(11), 2826–2841. https://doi.org/10.1039/C5SM02958A

Jacob, S., Kather, F. S., Boddu, S. H. S., Shah, J., & Nair, A. B. (2024a). Innovations in Nanoemulsion Technology: Enhancing Drug Delivery for Oral, Parenteral, and Ophthalmic Applications. *Pharmaceutics 2024, Vol. 16, Page 1333*, *16*(10), 1333. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS16101333

Jacob, S., Kather, F. S., Boddu, S. H. S., Shah, J., & Nair, A. B. (2024b). Innovations in Nanoemulsion Technology: Enhancing Drug Delivery for Oral, Parenteral, and Ophthalmic Applications. *Pharmaceutics 2024, Vol. 16, Page 1333*, *16*(10), 1333. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS16101333

Johnson, D. J., Compton, D. A. C., & Canale, P. L. (1992). Applications of simultaneous DSC/FTIR analysis. *Thermochimica Acta*, *195*(C), 5–20. https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)80042-U

Kumar Shah, S., Chakraborty, G., Bhattarai, A., & De, R. (2022). Synergistic and antagonistic effects in micellization of mixed surfactants. In *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 368). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120678

KV, K., SR, A., PR, Y., RY, P., & VU, B. (2014). Differential Scanning Calorimetry: A Review. *Research & Reviews: Journal OfÂ Pharmaceutical Analysis*, *3*(3), 11–22. https://www.rroij.com/open-access/differential-scanning-calorimetry-a-review-.php?aid=34700&utm_source=chatgpt.com

Lei, F., Zeng, F., Yu, X., Deng, Y., Zhang, Z., Xu, M., Ding, N., Tian, J., & Li, C. (2023). Oral hydrogel nanoemulsion co-delivery system treats inflammatory bowel disease via anti-inflammatory and promoting intestinal mucosa repair. *Journal of Nanobiotechnology*, *21*(1), 1–19. https://doi.org/10.1186/S12951-023-02045-4/FIGURES/7

Liu, Y., Liang, Y., Yuhong, J., Xin, P., Han, J. L., Zhu, R., Zhang, M., Chen, W., Ma, Y., Du, Y., & Yu, X. (2024). Advances in Nanotechnology for Enhancing the Solubility and Bioavailability of Poorly Soluble Drugs. *Drug Design, Development and Therapy*, *18*, 1469. https://doi.org/10.2147/DDDT.S447496

More, S. M., Rashid, M. A., Kharwade, R. S., Taha, M., Alhamhoom, Y., Elhassan, G. O., Gangane, P., Asar, T. O., Pise, A., Kaleem, M., & Mujtaba, M. A. (2025). Development of Solid Self-Nanoemulsifying Drug Delivery System of Rhein to Improve Biopharmaceutical Performance: Physiochemical Characterization, and Pharmacokinetic Evaluation. *International Journal of Nanomedicine*, *20*, 267. https://doi.org/10.2147/IJN.S499024

Nakama, Y. (2017). Surfactants. *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 231–244. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802005-0.00015-X

Naseema, A., Kovooru, L., Behera, A. K., Kumar, K. P. P., & Srivastava, P. (2021). A critical review of synthesis procedures, applications and future potential of nanoemulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, *287*, 102318. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2020.102318

Pandey, P., Gulati, N., Makhija, M., Purohit, D., & Dureja, H. (2020). Nanoemulsion: A Novel Drug Delivery Approach for Enhancement of Bioavailability. *Recent Patents on Nanotechnology*, *14*(4), 276–293. https://doi.org/10.2174/1872210514666200604145755

Preeti, Sambhakar, S., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Rani, C., Saharan, R., Kumar, S., Geeta, & Sehrawat, R. (2023a). Nanoemulsion: An Emerging Novel Technology for Improving the Bioavailability of Drugs. *Scientifica*, *2023*. https://doi.org/10.1155/2023/6640103

Preeti, Sambhakar, S., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Rani, C., Saharan, R., Kumar, S., Geeta, & Sehrawat, R. (2023b). Nanoemulsion: An Emerging Novel Technology for Improving the Bioavailability of Drugs. *Scientifica*, *2023*(1), 6640103. https://doi.org/10.1155/2023/6640103

Ravera, F., Dziza, K., Santini, E., Cristofolini, L., & Liggieri, L. (2021). Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, *288*, 102344. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2020.102344

Rodriguez-Loya, J., Lerma, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2023). Dynamic Light Scattering and Its Application to Control Nanoparticle Aggregation in Colloidal Systems: A Review. *Micromachines 2024, Vol. 15, Page 24*, *15*(1), 24. https://doi.org/10.3390/MI15010024

Singh, M., Bharadwaj, S., Lee, K. E., & Kang, S. G. (2020). Therapeutic nanoemulsions in ophthalmic drug administration: Concept in formulations and characterization techniques for ocular drug delivery. *Journal of Controlled Release*, *328*, 895–916. https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2020.10.025

Suri, R., Beg, S., & Kohli, K. (2020). Target strategies for drug delivery bypassing ocular barriers. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *55*, 101389. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2019.101389

Vitória Minzoni de Souza Iacia, M., Eduarda Ferraz Mendes, M., Cristiny de Oliveira Vieira, K., Cristine Marques Ruiz, G., José Leopoldo Constantino, C., da Silva Martin, C., Eloizo Job, A., Alborghetti Nai, G., & Kretli Winkelstroter Eller, L. (2024). Evaluation of curcumin nanoemulsion effect to prevent intestinal damage. *International Journal of Pharmaceutics*, *650*, 123683. https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2023.123683

Wilson, R. J., Li, Y., Yang, G., & Zhao, C. X. (2022). Nanoemulsions for drug delivery. *Particuology*, *64*, 85–97. https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.05.009

Yablon, D., & Libera, M. (2019). Microscopy 101: Scanning Probes or Scanning Electrons: A Practical Guide to Select a Method for Nanoscale Characterization. *Microscopy Today*, *27*(6), 32–38. https://doi.org/10.1017/S1551929519001044

Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2007). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 1–40. https://doi. org/10.1007/978-0-387-39620-0_1

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.