

Recuperación de Petróleo: El Papel de la Nanotecnología y Bacterias Autóctonas “Oil Recovery: The Role of Nanotechnology and Indigenous Bacteria”

Lic. Mary Elizabeth Sánchez Labrada¹, ORCID: 0009-0005-1817-8143*

María Esther Montalván García¹, ORCID 0009-0009-7708-7435

Silvia Lilibet Acosta Díaz¹ ORCID 0000-0002-0140-2760

(1) Centro de Investigación del Petróleo, Calle Churruca No.481 e/Vía Blanca y Washington, Cerro, código postal 10600. La Habana Cuba.

Correo: ms4878892@gmail.com

. C.P. 03940

(hector.ruiz@correo.buap.mx)

Resumen

La creciente demanda de petróleo, combustibles y productos petroquímicos, junto con los problemas de contaminación ambiental, ha impulsado la búsqueda de tecnologías sostenibles que permitan mantener la producción de hidrocarburos. Ante la disminución de las reservas, la industria petrolera ha recurrido a procesos biotecnológicos basados en microorganismos para recuperar el crudo residual en los yacimientos. Esta técnica, conocida como recuperación asistida por bacterias o *Microbial Enhanced Oil Recovery* (MEOR), consiste en la inyección de microorganismos seleccionados en el reservorio, donde se estimula la producción y transporte de sus metabolitos. Dichos productos metabólicos actúan reduciendo el petróleo residual, ya sea movilizándolo o funcionando como agentes tapón que bloquean zonas no deseadas del yacimiento. MEOR se presenta como una alternativa prometedora frente a métodos convencionales, pues aprovecha la capacidad natural de los microorganismos para modificar las condiciones del reservorio y facilitar la extracción. Sin embargo, su eficiencia puede incrementarse significativamente mediante la incorporación de la nanotecnología. El uso de nanoestructuras en los medios de cultivo y en la interacción con el petróleo influye en la fisiología bacteriana, mejora la producción de metabolitos y optimiza la relación entre microorganismos y crudo. Esta sinergia entre biotecnología y nanotecnología abre nuevas perspectivas para la recuperación terciaria de hidrocarburos, ofreciendo procesos más efectivos y respetuosos con el medio ambiente. El objetivo de esta revisión es realizar un estudio bibliográfico sobre el impacto de la nanotecnología aplicada a la biotecnología en la recuperación mejorada de petróleo, destacando su potencial para transformar la industria energética.

Palabras Claves: biotecnología; MEOR; nanoproducto; nanoestructura; recuperación mejorada

Abstract

The growing demand for oil, fuels, and petrochemical products, together with environmental pollution issues, has driven the search for sustainable technologies that can maintain hydrocarbon production. Due to the decline in reserves, the oil industry has resorted to biotechnological processes based on microorganisms to recover residual crude oil from reservoirs. This technique, known as microbial enhanced oil recovery (MEOR), consists of injecting selected microorganisms into the reservoir, where the production and transport of their metabolites are stimulated. These metabolic products act by reducing residual oil, either by mobilizing it or by functioning as plugging agents that selectively block undesired zones of the reservoir. MEOR emerges as a promising alternative to conventional methods, as it harnesses the natural capacity of microorganisms to modify reservoir conditions and facilitate extraction. However, its efficiency can be significantly increased through the incorporation of nanotechnology. The use of nanostructures in culture media and in the interaction with oil influences bacterial physiology, enhances metabolite production, and optimizes the relationship between microorganisms and crude oil. This synergy between biotechnology and nanotechnology opens new perspectives for tertiary hydrocarbon recovery, offering more effective and environmentally friendly processes. The objective of this research is to conduct a bibliographic study on the impact of nanotechnology applied to biotechnology in enhanced oil recovery, highlighting its potential to transform the energy industry.

Key Words: biotechnology; MEOR; nanostructure; nanoproduct; enhanced recovery

Introducción

Dado que el petróleo es la principal fuente de energía y materia prima para la industria química mundial, las técnicas de exploración y extracción se investigan y optimizan constantemente. Las reservas de petróleo ligero se están agotando y la necesidad de transportar líquidos completos plantea nuevos problemas a las refinerías para satisfacer la creciente demanda. En general, alrededor del 10 % del petróleo inicial en sitio (IOIP) es recuperable mediante la producción primaria, y la recuperación secundaria puede impulsar la producción a un tercio del IOIP, y aún quedan dos tercios en sitio. En otras palabras, un gran volumen de petróleo permanece irrecuperable después de que las tecnologías convencionales alcanzan su límite económico.

La selección del método de recuperación óptimo está influenciada significativamente por cuestiones económicas. En consecuencia, el desarrollo de tecnologías rentables que lleven las máximas reservas de petróleo a producción es un tema principal de interés en la investigación energética actual. La recuperación mejorada de petróleo microbiana es potencialmente una técnica de bajo costo en la que se emplean diferentes microorganismos y sus productos metabólicos para explotar el petróleo remanente atrapado en el yacimiento (Mindiola & Rondón, 2021).

La intersección de la nanotecnología con la biotecnología abre un abanico de posibilidades en la optimización de la recuperación de hidrocarburos. Los microorganismos, esos diminutos seres que desempeñan un papel crucial en los ecosistemas de nuestro planeta, tienen la capacidad de biodegradar compuestos complejos y mejorar la movilidad del petróleo atrapado en formaciones geológicas. Incorporar herramientas nanotecnológicas en este proceso puede facilitar la producción de biopolímeros y surfactantes a nanoescala, optimizando así la eficiencia de estos microorganismos en la extracción de petróleo. Los métodos MEOR ofrecen varias ventajas únicas sobre otros procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Primero, las tecnologías no requieren grandes cantidades de consumo de energía como lo hacen los procesos térmicos; segundo, los productos microbianos son usualmente biodegradables e inofensivos; tercero, la implementación de

procesos microbianos es fácil de manejar en el campo, porque requiere modificaciones mínimas a las instalaciones existentes (Mindiola & Rondón, 2021).

La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala (un nanómetro es la billonésima parte de un metro), la cual ha venido a revolucionar los nuevos productos. En otras palabras, es tecnología aplicada a la manipulación de átomos y moléculas para crear materiales y productos innovadores. Con el desarrollo del pensamiento científico, el ser humano ha logrado el control sobre los átomos y moléculas, y los expertos de la nanotecnología los acomodan en diferentes formas para producir nanomateriales con aplicaciones diversas (Castañeda Naranjo & Pérez Naranjo, 2014).

La nanotecnología, es un campo fascinante que se adentra en el mundo de lo infinitesimal, ha revolucionado no solo la manera en que entendemos la ciencia y la ingeniería, sino también cómo abordamos desafíos globales como la recuperación de recursos energéticos. En un escenario donde la demanda de petróleo sigue aumentando, los métodos tradicionales de extracción a menudo resultan insuficientes y perjudiciales para el medio ambiente. En este contexto la nanotecnología ha emergido como un campo innovador que ofrece nuevas herramientas para potenciar la eficiencia de la MEOR. El uso de nanopartículas biosintetizadas y nanocompuestos funcionales permite mejorar la interacción entre microorganismos y petróleo, reduciendo la tensión interfacial, aumentando la solubilidad de hidrocarburos y actuando como catalizadores enzimáticos (Eseigbe & Ikiensikimama, 2025).

La integración de nanomateriales con bacterias autóctonas representa un nuevo paradigma en la recuperación mejorada de petróleo, ya que combina la adaptabilidad de los consorcios microbianos a condiciones extremas con las propiedades fisicoquímicas únicas de los nanomateriales. Este enfoque interdisciplinario no solo busca maximizar la producción de crudo, sino también reducir el impacto ambiental asociado a métodos

químicos tradicionales (Pinzón Sarmiento & Soto Ortigón, 2024; Hormazabal Cruz, 2024). Por lo tanto, el presente artículo de revisión tiene como objetivo analizar el estado del arte de la nanotecnología aplicada a la MEOR con bacterias autóctonas, destacando la sinergia entre biotecnología y nanotecnología, y las perspectivas futuras de esta estrategia en la industria petrolera.

Convergencia de la ciencia y la tecnología: Microbiología y Nanotecnología

Nanociencia es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala nanométrica. Nanotecnología es el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica. Puesto que el término "nanotecnología" abarca un amplio rango de herramientas, técnicas y potenciales aplicaciones, algunos científicos encuentran más apropiado llamarlas nanotecnologías (Mendoza Uribe & López Ramírez-Luna, 2007). Es una disciplina transversal, ya que hace uso de diversas ramas de la ciencia para dar respuesta a las necesidades tecnológicas de la industria, entre las disciplinas que convergen en ellas se encuentran la química, la física, la biología, la medicina y la ingeniería. Como se observa, se necesitan de muchas ciencias y/o disciplinas para el estudio y utilización de nanoestructuras, es decir, que las nanotecnologías son un campo inter y multidisciplinario (Gómez Martínez, 2022).

Las disciplinas de la Microbiología y la Nanotecnología, en conjunto, han fortalecido el campo de la ciencia y la tecnología al ofrecer soluciones innovadoras para el bienestar humano y el mantenimiento del equilibrio ambiental y ecológico. La fusión de estos campos ofrece soluciones innovadoras y sostenibles de forma racional. La nanociencia impacta diversas áreas de la microbiología. Permite el estudio y la visualización a nivel de ensamblaje molecular de un proceso. Facilita la identificación de motivos de reconocimiento molecular y autoensamblaje, así como la evaluación de estos procesos. En concreto, existen tres áreas en las que los microbiólogos utilizan

técnicas nanotecnológicas (Ball, Patil, & Soni, 2019):

- Imágenes de moléculas individuales;
- Manipulación de objetos a escala nanométrica (trampas láser y pinzas ópticas) y;
- Determinación de la organización espacial en microorganismos vivos (AFM, microscopía de campo cercano/lejano).

Obtención de nanopartículas

Las nanopartículas (NP, de forma abreviada) pueden fabricarse mediante diferentes métodos físicos y químicos. Estos métodos tradicionales de síntesis de NP son laboriosos, requieren mucho tiempo y se basan en el uso de productos químicos tóxicos (citotóxicos, genotóxicos, cancerígenos). Estos compuestos además actúan como potentes contaminantes ambientales. Para evitar estos inconvenientes se han desarrollado técnicas más eficientes, fiables, inocuas y ecológicas. Las NP se han sintetizado a partir de fuentes naturales como el sistema biológico, microorganismos y sus enzimas, y polímeros biodegradables.

El empleo de sistemas biológicos hace factible la obtención de NP ya que pueden controlarse las características de toxicidad y tamaño. Muchos investigadores han explorado el uso de bacterias, actinobacterias, hongos, levaduras, microalgas y virus para la producción de las NP deseadas. Las bacterias y las microalgas poseen el potencial específico de fabricar nanomateriales distintivos, como exopolisacáridos, nanocelulosa y nanocables. La fabricación de NP a partir de fuentes vivas (bacterias, actinobacterias, levaduras, hongos, algas y virus) es bastante más segura que la de los métodos químicos y físicos. Los microbios, por ejemplo, pueden adaptarse en concentraciones elevadas de metales y tienen el potencial de reducir materiales inorgánicos en NP a través de sus rutas extracelulares o intracelulares. Estos absorben iones metálicos de su entorno/medio circundante y convierten estos iones metálicos en forma elemental a través de una reducción enzimática. En la literatura se refiere el uso preferente de bacterias ya que estas pueden cultivarse en condiciones artificiales con una tasa de crecimiento adecuada (Suthar, Patel, Chaudhari, & Prakash, 2018).

Nanotecnología aplicada a la industria petrolera

La nanotecnología ofrece un enorme potencial para aumentar la recuperación neta de los yacimientos nuevos y existentes, ampliar el área de aplicaciones para aguas profundas, y encontrar soluciones para la producción de hidrocarburos no convencionales. Esta tecnología puede ser la piedra angular de cualquier tecnología futura de energía que ofrece la esperanza de extender la línea de vida de nuestros recursos energéticos actuales, aportando soluciones innovadoras (Cruz Santiago, 2013).

En esta técnica se dispersan nanopartículas en un fluido base que se inyectan en yacimientos para mejorar la eficiencia de EOR (Recuperación mejorada). Las nanopartículas disminuyen la tensión interfacial dentro del yacimiento, elevando la movilidad del petróleo y optimizando la eficiencia del barrido. Los investigadores están explorando diversas nanopartículas, como alúmina, óxido de hierro y sílice (Rodríguez, 2024).

La nanotecnología en la industria del petróleo presenta ventajas sensibles, que permite el mejoramiento de materiales, herramientas y dispositivos que no se pueden realizar con tecnologías convencionales debido a que tienen combinaciones únicas de propiedades mecánicas, térmicas, electrónicas, ópticas y magnéticas.

Por ejemplo, los nano-dispositivos tienen el potencial de mejorar sustancialmente la caracterización e imagen de los yacimientos y la resolución sísmica, permite caracterizar la complejidad natural de la interacción roca-fluido y la identificación de aceite y gas atrapado, así como las mediciones de presión y temperatura en medios hostiles.

Los beneficios que la nanotecnología puede ofrecer a la industria del petróleo, son potencialmente enormes. Gracias a las nanopartículas se pueden obtener propiedades del fluido con menor cantidad de material para mejorar la perforación de HPHT (Alta presión / alta temperatura). Se destacan un gran número de aplicaciones para recobro mejorado, orientadas hacia la identificación, análisis, manejo y optimización del flujo de fluidos desde el yacimiento hasta la superficie (Martínez, 2024).

Métodos de recuperación de petróleo

Para satisfacer la creciente demanda de petróleo, en un entorno de estrictas normas ambientales y fuerte presión económica y tecnológica, las industrias se han visto obligadas a desarrollar nuevas técnicas de extracción de hidrocarburos. Aproximadamente el 70% del petróleo convencional del mundo (un tercio del petróleo total disponible) está atrapado en reservorios marginales. Por ello, los esfuerzos de las compañías petroleras se abocan hacia la explotación de yacimientos maduros, la recuperación de los hidrocarburos que permanecen entrapados y que no fluyen de manera espontánea a través de los pozos de producción (Quraishi et al., 2021). El petróleo ha desempeñado un papel importante en el desarrollo económico global durante el último siglo. El consumo diario estimado de petróleo es de aproximadamente 100 millones de barriles y se estima un aumento anual del 1,7 %. Con el continuo aumento de la demanda energética y a medida que los yacimientos se agotan la recuperación de petróleo se vuelve cada vez más difícil, por tanto, es esencial mejorar los procesos de recuperación de petróleo mediante el uso de técnicas novedosas.

La tecnología de recuperación de petróleo consta de tres etapas: primaria, secundaria y terciaria. En la recuperación primaria se utilizan tecnologías convencionales como la energía natural, o sea, la presión de la formación para extraer petróleo y gas; en tales condiciones solo se extrae entre el 10 y el 20 % del petróleo total. En la recuperación secundaria se efectúa la inyección de agua/gas y la inyección de gas para extraer el petróleo crudo de los yacimientos, en estos casos no se supera un porcentaje de extracción de 50 % del petróleo originalmente presente. Mediante estos dos procesos, más de dos tercios del crudo original queda retenido debido a factores como la alta viscosidad, la movilidad reducida y la retención de petróleo en los poros de las rocas.

Para aumentar la eficiencia de la producción de petróleo de los yacimientos se aplican procesos de recuperación terciaria, los cuales se conocen como Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR, por sus siglas en inglés). Estas técnicas de avanzada permiten la

extracción del petróleo remanente después de las etapas de recuperación primaria y secundaria. El fundamento consiste en modificar las propiedades del yacimiento o del crudo (mojabilidad de la roca y tensión interfacial) para aumentar su movilidad y desplazamiento, al mismo tiempo que se reduce la viscosidad (Bryant & Lockhart, 2002), (Sen, 2008), (Lazar, Petrisor, & Yen, 2007). La selección de uno u otro método varía en función de las características del yacimiento (porosidad, permeabilidad, tipo de crudo, profundidad, etc.) y su viabilidad económica.

Entre los principales procesos de recuperación terciaria pueden mencionarse los siguientes:

- A. Métodos Térmicos: inyección de vapor, combustión in situ e inyección cíclica de vapor.
- B. Métodos Químicos: inyección de polímeros y surfactantes, inyección alcalina, inyección combinada (SP: Surfactante-Polímero) y ASP: (Alcalina- Surfactante-Polímero).
- C. Métodos de Inyección de Gases: inyección de CO₂, nitrógeno, gas natural y aire.
- D. Métodos microbianos (MEOR, por sus siglas en inglés)

Métodos de recuperación de petróleo nanotecnología y MEOR

Diversos estudios han demostrado que la nanotecnología puede complementar el MEOR mediante la entrega controlada de nutrientes, la protección microbiana y la estabilización de biosurfactantes (Smith et al., 2019; Zhang & Li, 2021; Hernández et al., 2023). En este enfoque, los microorganismos como bacterias, se utilizan para producir compuestos metabólicos como biosurfactantes, biopolímeros y gases, que ayudan a mejorar la recuperación de petróleo. La nanotecnología ofrece diferentes métodos para un mejor empleo de MEOR a través de:

- **Entrega Controlada de Nutrientes**
Encapsular los nutrientes en nanopartículas que los protegen de la degradación y la adsorción, y que permiten su liberación controlada en el tiempo y el espacio. Las nanopartículas actúan como "transportadores" de nutrientes, liberándolos gradualmente a medida que se degradan o se

difunden a través de sus paredes. Se pueden diseñar nanopartículas sensibles al pH, la temperatura, o la presencia de ciertos compuestos para liberar los nutrientes en respuesta a las condiciones del reservorio.

- **Protección Microbiana**
Encapsular los microorganismos en nanopartículas para protegerlos de las condiciones adversas del reservorio y aumentar su supervivencia y actividad. La encapsulación crea una barrera física que aísla a los microorganismos del entorno hostil. Se pueden utilizar polímeros biocompatibles para encapsular a las bacterias y protegerlas de la alta salinidad, la temperatura extrema y la presencia de compuestos tóxicos.

- **Estabilización de Biosurfactantes**
Adsorber o encapsular los biosurfactantes en nanopartículas para protegerlos de la degradación, la adsorción en la roca y la precipitación. Las nanopartículas actúan como "anclajes" que evitan que los biosurfactantes se dispersen o se degraden. Se pueden utilizar nanopartículas de óxido de grafeno para adsorber los biosurfactantes y aumentar su estabilidad y eficacia en la reducción de la tensión interfacial.

- **Movilización Selectiva de Microorganismos**
Dirigir los microorganismos a zonas específicas del reservorio donde se necesita su actividad. Funcionalizar las nanopartículas con ligandos que se unen selectivamente a componentes del petróleo o de la roca, permitiendo la entrega dirigida de microorganismos a estas zonas.

- **Mejora de la Permeabilidad**
Utilizar nanopartículas para eliminar los bloqueos en los poros de la roca que impiden el flujo de fluidos y la actividad microbiana. Las nanopartículas pueden disolver los depósitos de asfáltenos o parafinas que obstruyen los poros, o pueden modificar la humectabilidad de la roca para facilitar la penetración de los microorganismos.

- **Monitoreo del Reservorio**
Utilizar las nanopartículas como trazadores para rastrear la distribución de los microorganismos, la producción de metabolitos y la efectividad del tratamiento MEOR. Las nanopartículas fluorescentes o

radiactivas se inyectan junto con los microorganismos y se detectan a distancia para obtener información sobre el proceso de recuperación.

Existen variedades de nanomateriales que pueden ser empleados en MEOR. En la tabla 1, se muestran algunos de ellos.

Tabla I. Nanomateriales empleados en MEOR/ Table I. Nanomaterials Used in MEOR

Nanopartículas	Funciones para MEOR
Sílice (SiO ₂)	Mesoporosas o funcionalizadas para la entrega de nutrientes y la protección microbiana.
Poliméricas	Alginato, quitosano, PLGA para la encapsulación de los microorganismos.
Óxido de Grafeno (GO)	Adsorción y estabilización de biosurfactantes.
Magnéticas (Fe ₃ O ₄)	Movilización selectiva de microorganismos.
Quantum Dots (QDs)	Monitoreo del reservorio.
Liposomas	Encapsulación de nutrientes y fármacos.

Beneficios de la combinación Nanotecnología–MEOR Incremento en la eficiencia de recuperación de crudo

La integración de nanopartículas con procesos microbianos permite mejorar la movilidad del petróleo residual atrapado en los poros del reservorio. Las nanopartículas reducen la tensión interfacial y actúan como agentes estabilizadores, mientras que los microorganismos producen biosurfactantes y biopolímeros que facilitan la liberación del crudo (Sen, 2008; Lazar, Petrisor, & Yen, 2007). Esta sinergia logra una mayor eficiencia en campos maduros donde los métodos convencionales resultan limitados.

Reducción de costos operativos

La biosíntesis de nanopartículas mediante bacterias, hongos o algas es más económica y sostenible que los métodos químicos tradicionales (Hulkoti & Taranath, 2014). Además, los procesos MEOR requieren menos energía y químicos agresivos, lo que disminuye los gastos de operación y mantenimiento en comparación con técnicas térmicas o químicas (Bryant & Lockhart, 2002).

Sostenibilidad ambiental

El uso de nanopartículas biogénicas y microorganismos reduce la dependencia de compuestos tóxicos, favoreciendo una nanotecnología verde (Durán et al., 2007). Asimismo, la biodegradabilidad de los biosurfactantes producidos por los microbios minimiza el impacto ambiental y se alinea con políticas de transición energética hacia procesos más limpios (Quraishi et al., 2021).

Versatilidad y aplicaciones avanzadas

Las nanopartículas funcionalizadas pueden servir como vectores inteligentes, liberando

nutrientes o estimulantes para microorganismos en zonas específicas del yacimiento. Además, la combinación Nanotecnología–MEOR abre la puerta a nanosensores bio-híbridos capaces de monitorear en tiempo real la actividad microbiana y las condiciones del reservorio (Wang, Yang, Zhang, & Liu, 2010).

Desafíos y Consideraciones de la Nanotecnología-MEOR

Desafíos técnicos

- **Escalabilidad:** Aunque los estudios de laboratorio muestran resultados prometedores, trasladar la nanotecnología-MEOR a condiciones de campo sigue siendo complejo debido a la heterogeneidad de los yacimientos (Sen, 2008).
- **Estabilidad de nanopartículas:** Las nanopartículas biosintetizadas pueden agregarse o perder funcionalidad en ambientes de alta presión y temperatura (Quraishi et al., 2021).
- **Interacción con microorganismos:** La compatibilidad entre nanopartículas y comunidades microbianas es crítica para evitar efectos tóxicos que reduzcan la eficiencia del proceso (Lazar, Petrisor, & Yen, 2007).

Consideraciones económicas

- **Costos de producción:** La biosíntesis de nanopartículas puede ser más sostenible, pero aún requiere optimización para competir con métodos químicos convencionales (Pantidos & Horsfall, 2014).
- **Viabilidad comercial:** La inversión inicial en tecnologías de nanotecnología-MEOR es elevada, lo que limita su adopción en

países con menor capacidad tecnológica (Bryant & Lockhart, 2002).

Aspectos ambientales

- **Impacto ecológico:** La liberación de nanopartículas en el subsuelo plantea riesgos de bioacumulación y toxicidad ambiental si no se controla adecuadamente (Durán et al., 2007).
- **Sostenibilidad:** La nanotecnología verde, basada en biosíntesis, busca minimizar estos riesgos y ofrecer alternativas más seguras (Hulkoti & Taranath, 2014).

Dimensión ética y social

- **Transparencia y regulación:** Es necesario establecer marcos regulatorios claros para el uso de nanomateriales en la industria petrolera, garantizando seguridad y justicia social.
- **Aceptación pública:** La percepción social de la nanotecnología puede influir en su implementación, especialmente en sectores sensibles como energía y medio ambiente.

Condiciones de yacencia de los microorganismos autóctonos

Las bacterias autóctonas de yacimientos de petróleo son microorganismos que se encuentran de manera natural en el entorno subsuperficial de los yacimientos, desempeñando un papel fundamental en procesos geobiológicos que afectan la calidad y cantidad de petróleo. Estas bacterias, que se han adaptado evolutivamente a condiciones de alta presión y temperatura, así como a la presencia de hidrocarburos, poseen mecanismos únicos que permiten degradar compuestos orgánicos presentes en el petróleo, facilitando así su recuperación. Investigaciones recientes han demostrado que estas bacterias pueden participar activamente en la biorremediación de yacimientos, transformando hidrocarburos pesados en compuestos ligeros y solubles que son más fáciles de extraer.

Además, su capacidad para producir tensoactivos biológicos mejorar la movilidad de los aceites en los reservorios, lo que se traduce en un aumento en los rendimientos de recuperación. La variabilidad genética y metabólica de las bacterias autóctona permite una adaptación a diferentes condiciones

geológicas y químicas, ofreciendo un potencial significativo para la recuperación mejorada de petróleo. Los estudios han identificado cepas de estas bacterias, como los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*, que muestran comportamientos eficientes en la solubilización de hidrocarburos y en la producción de bioemulsificantes. En consecuencia, la comprensión de las interacciones entre estas bacterias y el petróleo, así como la optimización de su uso, se están convirtiendo en áreas de investigación activa en el ámbito de la nanotecnología aplicada en la recuperación mejorada de petróleo, abriendo nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia de la producción petrolera y reducir el impacto ambiental asociado a las actividades de extracción.

Para la extracción de petróleo por microorganismos, es necesario dominar las condiciones en que estos se desarrollan. Debido a la alta temperatura, condiciones anaeróbicas, altas presiones, grado de salinidad y diferente pH en los reservorios de petróleo, se ha convertido en un nuevo ambiente extremo para el crecimiento de organismos vivos en estos reservorios (Cheng, Li, & Yang, 2021).

A pesar de las condiciones extremas, numerosos estudios han demostrado la presencia de microorganismos en varios entornos de yacimientos de petróleo. En la actualidad existe un mayor conocimiento sobre la diversidad de las comunidades microbianas autóctonas de los reservorios de petróleo. En ellos es posible encontrar gran variedad de poblaciones microbianas, entre las cuales, las bacterias sulfato-reductoras (BSR) y nitrato-reductoras (BNR), las bacterias degradadoras de hidrocarburos (BDH) y arqueas formadoras de metano (AFM) son parte imprescindible en el ecosistema del yacimiento y desempeñan un comportamiento crítico en los procesos de MEOR (Gao, Kang, & Zhang, 2020).

Varias son las funciones que se le atribuyen a las mencionadas poblaciones microbianas. Según Gao y cols., (2015b). La mayoría de las BDH producen biotensoactivos cuando crecen en presencia de hidrocarburos como fuente de carbono. Las BSR son responsables del incremento del sulfuro de hidrógeno (H₂S),

compuesto relacionado con la corrosión en los oleoductos, tanques de almacenaje y equipos de producción (Omoniyi, 2015). El aumento de su concentración provoca el taponamiento del yacimiento por la acumulación de minerales de sulfuro e incrementa el riesgo a la salud de los trabajadores por su elevada toxicidad (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022). Para contrarrestar el efecto de las BSR, la estimulación de las BNR mediante la aplicación de nitrato, nitrito o mezclas de molibdato/nitrato en el agua de inyección, favorece el crecimiento de las BNR sobre las BSR, las que por competencia disminuye (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022). Además, la inyección de nitrato beneficia el proceso de MEOR porque estimula la actividad metabólica de la comunidad microbiana, genera la producción de N_2 , CO_2 , biotensoactivos y produce un taponamiento selectivo debido a la formación de biomasa, ya que actúa como un poderoso aceptor de electrones (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022).

Las arqueas metanogénicas metabolizan el hidrógeno y CO_2 presentes en el reservorio, así como acetato y metilaminas, produciendo metano que incrementa la presión del yacimiento y disminuye la viscosidad del crudo. La inyección de agua en los pozos, para que se aumente la extracción de petróleo, introduce microorganismos exógenos, los cuales pueden adaptarse a este nuevo ambiente desfavorable, establecerse y transformar el ecosistema autóctono existente (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022).

Los microorganismos mencionados anteriormente, están adaptados a las severas condiciones de yacencia entre las que se destacan: potencial redox, pH, salinidad, temperatura, presión y escasez de nutrientes (Yernazarova, 2016):

• **Potencial Redox (reducción y oxidación):** En los yacimientos es bajo debido a la ausencia de oxígeno, el comportamiento de estos microorganismos es debido a que son capaces de obtener su energía metabólica a partir de reacciones en la que moléculas orgánicas son oxidadas a niveles superiores sin la participación de oxígeno molecular.

• **pH:** El rango óptimo de pH en el cual las bacterias son capaces de crecer se encuentra

en un estrecho margen alrededor de pH 7. El rango de pH presente en los petróleos en condiciones de reservorio varía entre un valor de 3 y 10 aunque frecuentemente se encuentra cercano a 7. Los extremos de este rango de pH presentan condiciones extremas de subsistencia para la mayoría de los microorganismos.

• **Salinidad:** La salinidad del agua de formación en donde los microorganismos son introducidos puede generar el problema de inhibir el exitoso crecimiento de las bacterias. Con excepción a las bacterias halófilas, que son tolerantes a las altas concentraciones de sal, las bacterias son generalmente capaces de crecer sólo en concentraciones bajas de sal. Para altas salinidades hay trabajos recientes que sugieren el empleo de especies de *Bacillus* formadores de esporas, anaeróbicas y productoras de gas capaces de crecer en soluciones de 7% de NaCl.

• **Temperatura:** La temperatura de formación limita la profundidad a la cual el MEOR puede ser utilizado con microorganismos mesófilos comunes. Aunque es conocido que las bacterias sobreviven hasta temperaturas de 90°C a 100°C, el límite superior de temperatura que asegura un óptimo crecimiento no debería exceder los 55°C. Se ha sugerido que las técnicas de MEOR podrían utilizar mayores temperaturas si se seleccionan bacterias termófilas con las características metabólicas deseadas.

• **Presión:** Frecuentemente, la alta presión cambia la morfología de las células. El efecto de presión hidrostática sobre diferentes especies de bacterias varía enormemente, pero algunas de ellas se han adaptado exitosamente a ambientes de alta presión, como es el caso de las bacterias autóctonas del yacimiento. En general la alta presión tiene menor influencia en la actividad metabólica celular que el efecto de temperatura.

• **Nutrientes:** Las características que deben tener los nutrientes seleccionados son simplemente que los organismos sean capaces de crecer exitosamente en base al nutriente, que el producto metabólico ayude a contribuir en la migración del petróleo y que el nutriente en sí sea barato. El resultante crecimiento de las bacterias y la producción de productos metabólicos, produce un efecto de liberación de petróleo que no podría haber sido recuperado mediante otros productos.

Los estudios microbianos de un entorno tan duro, han demostrado la presencia de

actividades metabólicas diferentes, como reductores de sulfato, varios microorganismos fermentadores hipertermofílicos, acetógenos y metanógenos de depósitos de petróleo en todo el mundo. Mediante técnicas moleculares se ha aislado o detectado una amplia diversidad de bacterias dependientes de factores abióticos como el oxígeno, la temperatura y el pH en muestras de yacimientos petrolíferos (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022).

Se han encontrado microorganismos aeróbicos en yacimientos de petróleo con un rango de pH (6,0 - 8,4) y temperaturas que oscilan entre (20 y 70 °C). Algunas de estas bacterias aerobias identificadas *Kocuria rosea*, *Rhodococcus ruber*, *Gordonia rubropertincta*, *Arthrobacter oxydans*, *Bacillus subtilis*, *B. cereus*, *Cellulomonas cellulans*, *Pseudomonas fluorescens* y comúnmente bacterias de los géneros *Clostridium*, *Bacteroides*, *Thermoanaerobacter*, *Thermotogales*, *Petrotoga*, *Thermotoga*, *Geosporobacter*, *Desulfotomaculum*, *Camnicella* representan la microbiota anaerobia se encontraron en depósitos de petróleo (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022).

Morfología y fisiología de las bacterias empleadas en MEOR

Morfología bacteriana

Las bacterias utilizadas en MEOR presentan una amplia diversidad morfológica que les permite adaptarse a los ambientes extremos de los yacimientos petroleros. Se han identificado principalmente **cocos y bacilos**, aunque también se emplean cepas filamentosas y espirilos que facilitan la penetración en los poros del reservorio (Diversidad Microbiana, s.f.). La **estructura de la pared celular** es determinante: las bacterias **Gram positivas**, como *Bacillus*, poseen una pared gruesa de peptidoglicano que les confiere resistencia a altas presiones y temperaturas, mientras que las **Gram negativas**, como *Pseudomonas*, presentan membranas externas con lipopolisacáridos que favorecen la producción de metabolitos como biosurfactantes (Estudiapuntos, s.f.; Sen, 2008).

Fisiología bacteriana

La fisiología de estas bacterias está orientada a la producción de compuestos que favorecen la recuperación de petróleo:

- **Metabolismo energético:** muchas especies son **anaerobias facultativas**, capaces de sobrevivir en ambientes con baja disponibilidad de oxígeno, lo que las hace idóneas para condiciones de reservorio (Yernazarova, 2016).
- **Producción de biosurfactantes y biopolímeros:** los biosurfactantes reducen la tensión interfacial entre agua y petróleo, mientras que los biopolímeros bloquean zonas de alta permeabilidad y redirigen el flujo hacia áreas con crudo atrapado (Lazar, Petrisor, & Yen, 2007; Gao, Kang, & Zhang, 2020).
- **Generación de gases (CO₂, CH₄, H₂):** estos metabolitos aumentan la presión del reservorio y ayudan a movilizar el petróleo residual (Omoniyi, 2015).
- **Resistencia ambiental:** muchas cepas toleran altas temperaturas y salinidad, condiciones típicas de los yacimientos, e incluso forman esporas que garantizan su persistencia en ambientes hostiles (Hernández et al., 2022).

Relevancia en MEOR

La combinación de **morfología adaptable** y **fisiología versátil** convierte a estas bacterias en herramientas biotecnológicas clave para la recuperación mejorada de petróleo. Su capacidad de producir metabolitos útiles y resistir condiciones extremas asegura su eficacia en procesos de campo, especialmente cuando se integran con nanotecnología para potenciar su desempeño (Quraishi et al., 2021).

Metabolismo de los microorganismos en los yacimientos

Los yacimientos de petróleo constan de diferentes fases en las que los microorganismos pueden prosperar, como el petróleo crudo, el agua de formación y las superficies sólidas de roca y materiales orgánicos (Pannekens, Müller, Mbow, & Meckenstock, 2019).

Los microorganismos producen una variedad de metabolitos durante su ciclo de vida que pueden ser útiles para la recuperación de petróleo. Dichos metabolitos bioactivos pueden disminuir la tensión entre las fases

agua-crudo o crudo-roca y aumentar la solubilidad por la acción de los biotensoactivos, producir un taponamiento selectivo por el crecimiento del propio microorganismo o por sus bioproductos, y disminuir la viscosidad del crudo. Además, los microorganismos pueden degradar largas cadenas hidrocarbonadas y producir ácidos los cuales disuelven minerales en la roca, aumentando su permeabilidad (Hernández, Acosta, León, Montalván, Hernández, & Jeréz, 2022). Los bioproductos se generan en el yacimiento y se encargan de mejorar la movilidad del crudo; eliminar los depósitos de asfaltenos; parafinas, escamas y la corrosión en las tuberías de producción.

El propósito de la inyección de bacterias dentro del reservorio que contiene petróleo, está diseñado para permitir que las células penetren en el interior de la formación y así produzcan productos metabólicos que en contacto con el petróleo permitan su flujo de manera que éste pueda ser recuperado. La producción de productos metabólicos dentro del reservorio es más efectiva en términos de liberación de petróleo que si la formación fuese simplemente barrida con químicos bombeados a través de la roca desde los pozos inyectoros. La penetración de bacterias fue estudiada y se encontró que el caudal y la extensión de la penetración no presentaba correlación con la porosidad o permeabilidad.

Los ensayos de laboratorio en rocas entre 200 y 400 md. mostraron que la penetración no era función del tamaño de las bacterias sino dependiente de la concentración. La carga eléctrica en la superficie de la roca es también considerada un factor clave para obtener altas penetraciones (Cobefías, Valdez Rojas, & Hogg, 2020). Entre los bioproductos útiles para los procesos de MEOR se encuentran (Omoniyi, 2015): biomasa bacteriana; polímeros: polisacáridos, goma xantano, zanflo y emulsificantes; ácidos: butírico, fórmico, acético, láctico y propiónico; gases: metano, dióxido de carbono e hidrógeno; biotensoactivos (BTA): trealolípidos, ramnolípidos y lipopolisacáridos, beneficiosos para el yacimiento y mejoran la movilidad del crudo con respecto al agua.

Encapsulación de bacterias o sus metabolitos en nanopartículas

La encapsulación de bacterias enteras o sus metabolitos (como lipopolisacáridos, proteínas o ADN) en nanopartículas representa una estrategia innovadora en nanotecnología. En el caso particular de MEOR se utilizan bacterias para producir biosurfactantes, biopolímeros, biogases y bioenzimas que mejoran la movilidad del crudo. La encapsulación en nanopartículas se ha consolidado como una estrategia biotecnológica avanzada para proteger bacterias y sus metabolitos, garantizando su viabilidad y funcionalidad en ambientes hostiles (Zhang et al., 2025).

En MEOR la encapsulación se realiza mediante técnicas como autoensamblaje polimérico, recubrimiento capa por capa, nanoprecipitación y el empleo de polímeros naturales (alginato, quitosano) o sintéticos (PLGA, PEG). Estas estrategias permiten proteger la viabilidad bacteriana o la estabilidad de los metabolitos, y controlar su liberación en condiciones hostiles como los reservorios de petróleo (Zhang et al., 2025).

Métodos de Encapsulación

- **Encapsulinas naturales**

Son nanocontenedores proteicos de 20–40 nm que se autoensamblan en bacterias y arqueas. Funcionan como cápsides similares a virus, capaces de encerrar proteínas o enzimas bacterianas, regulando procesos como el estrés oxidativo y la detoxificación. Estas estructuras pueden ser manipuladas genéticamente para introducir bacterias o metabolitos específicos (Rodríguez et al., 2021)

- **Polímeros naturales**

El uso de polímeros naturales como alginato y quitosano permite la formación de matrices biocompatibles que encapsulan células bacterianas, favoreciendo su liberación gradual y la producción sostenida de biosurfactantes (Viana da Silva et al., 2025). Por otro lado, los polímeros sintéticos como PLGA y PEG ofrecen estabilidad mecánica y control preciso de la cinética de liberación, siendo adecuados para metabolitos como enzimas y biopolímeros (Kumar et al., 2024).

- **Recubrimiento capa por capa**

El recubrimiento capa por capa (LbL) constituye otra técnica relevante, ya que deposita polímeros con cargas opuestas, creando barreras protectoras que regulan la

difusión de metabolitos y aumentan la resistencia bacteriana (Zhang et al., 2025).

- **Autoensamblaje polimérico**

Polímeros biocompatibles forman cápsulas alrededor de bacterias vivas o metabolitos, mejorando su resistencia a la presión y temperatura del yacimiento.

- **Nanoprecipitación e híbridos**

La nanoprecipitación e híbridos (sílice mesoporosa + polímeros) permiten encapsular biosurfactantes, mejorando la dispersión en medios porosos y la interacción con hidrocarburos. La nanoprecipitación encapsula los metabolitos bacterianos (biosurfactantes, biopolímeros) en polímeros sintéticos como PLGA, que permiten liberación controlada, mientras que los híbridos naturales-sintéticos combinan polímeros naturales (alginato, quitosano) con materiales sintéticos (PEG, sílice mesoporosa) para mejorar estabilidad y liberación prolongada. (Singh et al., 2023).

Medios de Cultivo Nanoestructurados

El desarrollo de los medios de cultivo nanoestructurados surge como una respuesta a las limitaciones de los métodos de cultivo bacteriano tradicionales, especialmente el lento crecimiento de muchas especies, particularmente las de interés clínico o ambiental (Santos, Ferrat, & Eichelmann, 2005). El lento crecimiento de patógenos dificulta el diagnóstico rápido en la práctica clínica, retrasando la elección del tratamiento más adecuado (Pfyffer, 2015). Además, influyen los largos tiempos de incubación (>24-48 horas, o incluso semanas para algunas bacterias), consumen recursos y ralentizan las investigaciones en microbiología, biotecnología y desarrollo de fármacos (Arshad et al., 2021).

El cultivo eficiente de microorganismos, ya sea a escala de laboratorio o industrial, depende fundamentalmente de la disponibilidad y asimilación efectiva de los nutrientes esenciales en el medio. Los métodos tradicionales a menudo presentan limitaciones relacionadas con la solubilidad, estabilidad y biodisponibilidad de compuestos críticos, especialmente en el caso de micronutrientes, vitaminas o factores de crecimiento lábiles (Lewis, 2004).

El proceso de captación de nutrientes en las bacterias es vital y está mediado por la membrana citoplasmática, una barrera

semipermeable que regula el paso de moléculas a través de los mecanismos de transporte:

- Transporte Pasivo (Difusión Simple y Facilitada): Ocurre a favor de un gradiente de concentración, sin requerir energía metabólica directa. Pequeñas moléculas hidrofóbicas o gases utilizan la difusión simple (Ames, 1986).
- Transporte Activo Simple: Utiliza la energía almacenada en el potencial electroquímico (fuerza protón motriz) para mover iones o nutrientes contra su gradiente de concentración (Ames, 1986).
- Sistemas de Translocación de Grupo: El nutriente es modificado químicamente durante su paso por la membrana (ej. fosforilación de glucosa), utilizando energía de compuestos de alta energía como el fosfoenolpiruvato (Ames, 1986)
- Transportadores Tipo ABC (ATP-Binding Cassette): Sistemas de alta afinidad que utilizan la hidrólisis de ATP para impulsar el movimiento de solutos (nutrientes) desde el exterior hacia el citoplasma, cruciales para la captación de nutrientes esenciales en bajas concentraciones (Kadner, 1997).

La nanotecnología ofrece una plataforma revolucionaria para superar estos desafíos mediante el diseño de medios nanoestructurados. La manipulación de la materia a escala de 1 a 100 nanómetros permite crear sistemas de liberación controlada que mejoran la eficiencia en el transporte de nutrientes a través de la membrana bacteriana y aumentan la biodisponibilidad de los componentes del medio, optimizando así el crecimiento y la productividad microbiana (Lamers et al., 2021).

La baja solubilidad de ciertos nutrientes, su degradación, o la asimilación ineficiente por parte de las células bacterianas, se logra mediante la encapsulación o la asociación de los nutrientes con nanoestructuras que actúan como "vehículos inteligentes" (Hussain & Jaleel, 2019).

La nanoencapsulación (utilizando nanocápsulas, nanoemulsiones o liposomas) es una estrategia clave para proteger y aumentar la biodisponibilidad de compuestos sensibles, como vitaminas, antioxidantes y, por extensión, factores de crecimiento o micronutrientes para los cultivos microbianos

(Hilty et al., 2010). Este método se utiliza ampliamente para liberación controlada y eficiente: Asegurando que el compuesto llegue a su destino en una forma activa, superando barreras y limitando la degradación (Agencia FAPESP, 2024).

Tipos de Nanoestructuras Portadoras

- **Nanopartículas Poliméricas:** Materiales como el ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA), quitosano o dendrímeros pueden encapsular nutrientes. El tamaño reducido (1 a 100 nm) y la superficie funcionalizada mejoran la solubilidad y la captación (Alabrahim & Azzazy, 2023).
- **Nanoemulsiones y Nanomicelas:** Partículas con estructuras aceitosas y acuosas que encapsulan compuestos lipofílicos o hidrofílicos (como la riboflavina) que, de otra forma, tendrían baja solubilidad en el medio de cultivo (Alabrahim & Azzazy, 2023).

Las nanoestructuras protegen los nutrientes de la degradación (térmica, lumínica o enzimática) en el medio externo. Permiten una liberación lenta y sostenida del nutriente en el tiempo, asegurando un suministro constante y una mayor disponibilidad en la zona de crecimiento bacteriano, lo que puede ser crucial para cepas con requerimientos específicos o un metabolismo lento. Su pequeño tamaño facilita la interacción con la superficie bacteriana o, en algunos casos, su internalización por parte de las células, aumentando la biodisponibilidad intracelular (Arshad et al., 2021).

El uso de estos medios nanoestructurados no solo es una cuestión de eficiencia de entrega, sino que afecta directamente a la fisiología bacteriana. Permite una mayor biodisponibilidad de nutrientes limitantes que se traduce en una mayor densidad celular y tasas de crecimiento superiores. Entrega controlada y focalizada de cofactores o precursores metabólicos clave puede dirigir las rutas metabólicas de la bacteria, favoreciendo la producción de metabolitos de interés (primario o secundario) (SciELO México, 2018).

Otra alternativa para el desarrollo de medios nanoestructurados es la incorporación de Nanomateriales (Aditivos Nanométricos) a medios de cultivo tradicionales como:

- **Nanopartículas Magnéticas Funcionalizadas:** Nanopartículas (ej. óxido de hierro) recubiertas con moléculas que capturan o concentran nutrientes específicos o factores de crecimiento, haciéndolos más biodisponibles para la bacteria. Esto puede acortar la fase de latencia y acelerar la entrada en la fase exponencial de crecimiento (Chen et al., 2014).
- **Nanopartículas de Carbono:** (ej. Nanotubos de Carbono): Se exploran como posibles "sensores" o "conductores" que podrían influir en el metabolismo bacteriano o en la transferencia de electrones, aunque su uso en el aceleramiento del crecimiento es un área de investigación más reciente y a menudo están más asociados con propiedades antibacterianas (Das & Mishra, 2020).
- **Nanopartículas con Función Amortiguadora:** Nanomateriales que ayudan a mantener un pH óptimo de manera más eficiente que los tampones químicos tradicionales, lo que es vital para un crecimiento rápido y continuo, ya que la producción de ácidos o bases puede frenar el crecimiento (Li et al., 2020).

La nanoescala aumenta la relación área/volumen, permitiendo una mayor interacción con las células bacterianas, permiten un ajuste fino de la topografía, rigidez, porosidad y disponibilidad de nutrientes, baja toxicidad debido que los materiales deben ser generalmente inertes o biocompatibles, evitando efectos antimicrobianos indeseados (Boulos et al., 2017).

La fabricación de soportes nanoestructurados y la síntesis de nanomateriales de alta calidad es cara y compleja a escala industrial (Gao et al. (2016)). Algunos nanomateriales, incluso a baja concentración, pueden ejercer un efecto inhibitorio o tóxico en ciertas cepas bacterianas (Roco, 2011). Además, la falta de protocolos y estándares uniformes para la evaluación del rendimiento de los medios de cultivo nanoestructurados dificulta la comparación de resultados entre laboratorios (Hussain & Jaleel, 2019). También la presencia de nanopartículas en el medio puede interferir con la turbidimetría o la microscopía tradicional usada para monitorear el crecimiento (Chen et al., 2014).

El diseño de medios de cultivo nanoestructurados de próxima generación basado en la implementación de sistemas de nanoencapsulación y nanopartículas permite controlar con precisión la cinética de liberación, proteger los compuestos bioactivos y aumentar la eficiencia del transporte de nutrientes. Esto no solo optimiza el crecimiento bacteriano, sino que también reduce la cantidad de factores de crecimiento caros o escasos necesarios, haciendo los procesos más sostenibles y rentables (Liu et al., 2018).

Conclusiones

La integración de estas dos disciplinas ofrece un camino prometedor para mejorar la recuperación de hidrocarburos de manera más eficiente y sostenible. Los medios nanoestructurados optimizan las condiciones de crecimiento y actividad de los microorganismos, favoreciendo su interacción con el petróleo residual y aumentando la liberación de hidrocarburos atrapados en la roca. Además, proporcionan mayor estabilidad frente a condiciones extremas de presión, temperatura y salinidad, lo que amplía la viabilidad de los cultivos microbianos en ambientes hostiles. Esta sinergia tecnológica no solo incrementa la eficiencia del proceso, sino que también reduce la dependencia de métodos químicos agresivos, disminuyendo el impacto ambiental. Sin embargo, se reconoce que aún existen retos importantes, como la escalabilidad, los costos de implementación y la evaluación de riesgos ecológicos asociados al uso de nanomateriales en sistemas naturales. En conjunto, la nanotecnología aplicada a MEOR representa una estrategia innovadora que combina precisión y adaptabilidad, abriendo nuevas posibilidades para la industria petrolera en su transición hacia prácticas más sostenibles.

Referencias

Agencia FAPESP. (2024). Científicos aplican la nanotecnología para potenciar los beneficios de las antocianinas. *Agencia FAPESP*. Recuperado de <https://agencia.fapesp.br>

Alabrahim, S. A., & Azzazy, H. M. E. (2023). Nanoencapsulation enhanced the aqueous solubility, stability, and penetration ability of *Pistacia lentiscus* essential oil, improving its

antimicrobial activity against *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli* compared to free essential oils. *SciELO Perú*, 2024.

Al-Sulaimani, H., Al-Wahaibi, Y., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A., & Joshi, S. (2011). Optimization and partial characterization of biosurfactants produced by *Bacillus* species for microbial enhanced oil recovery applications. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/140003-MS>

Ames, G. F.-L. (1986). Bacterial periplasmic transport systems: Structure, mechanism, and evolution. *Annual Review of Biochemistry*, 55, 397–425.

Arshad, R., Gulshad, L., Haq, I. U., Farooq, M. A., Al-Farga, A., Siddique, R., et al. (2021). Nanotechnology: A novel tool to enhance the bioavailability of micronutrients. *Food Science & Nutrition*, 9(6), 3354–3361.

Ball, A. S., Patil, S., & Soni, S. (2019). Introduction into nanotechnology and microbiology. En V. Gurtler, A. S. Ball, & S. Soni (Eds.), *Nanotechnology (Methods in Microbiology)*, Vol. 46, pp. 1–18). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.mim.2019.04.003>

Banat, I. M., Franzetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M. G., Fracchia, L., Smyth, T. J., & Marchant, R. (2010). Microbial biosurfactants production, applications and future potential. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(2), 427–444. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0>

Boulos, L., et al. (2017). Nano-patterned surfaces accelerate the growth of bacteria. *Nature Nanotechnology*, 12(6), 570–576.

Bryant, R. S., & Lockhart, T. P. (2002, abril). Microbial enhanced oil recovery: Current assessment and future directions. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, USA. Society of Petroleum Engineers.

Castañeda Naranjo, L. A., & Pérez Naranjo, J. P. (2014). Nanotecnología: fuente de nuevos paradigmas. *Mundo Nano: Revista*

Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 7(12), 1–15.

Chen, Z., et al. (2014). Interference of nanoparticles with microbial growth measurement: A critical assessment. *Environmental Science & Technology*, 48(12), 6810–6816.

Cheng, M., Li, Y., & Yang, L. (2021). Isolating, identifying and evaluating of oil degradation strains for the air-assisted microbial enhanced oil recovery process. *PLOS ONE*, 16(8), e0255832, 1–18.

Cruz Santiago, J. F. (2013). Nanotecnología aplicada a la industria petrolera [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. *Repositorio UNAM*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7652>

Diversidad Microbiana. (s.f.). Morfología de las bacterias. Recuperado de *Diversidad Microbiana* (diversidadmicrobiana.com in Bing)

Durán, N., Marcato, P. D., De Souza, G. I. H., Alves, O. L., & Esposito, E. (2007). Antibacterial effect of silver nanoparticles produced by fungal processes on textile fabrics and their effluent treatment. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 3(2), 203–208.

Eseigbe, G. O., & Ikiensikimama, S. S. (2025). Application of biosynthesized nanoparticles in chemical enhanced oil recovery: Main mechanisms, recent advances, challenges, and opportunities. *Petroleum Research*, 10(4), 818–836.

Estudiapuntos. (s.f.). Fundamentos de la tinción y morfología bacteriana. Recuperado de *Estudiapuntos* (estudiapuntos.com in Bing).

Gao, C. H., Zekri, A., & colaboradores. (2015). Applications of microbial enhanced oil recovery technology in the past decade. *RSC Advances*, 5(111), 90883–90894.

Gao, G., Kang, J., & Zhang, K. (2020). Microbial enhanced oil recovery through deep profile control using a conditional bacterial cellulose-producing strain derived from

Enterobacter sp. FY-07. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 1–11.

Gao, S., et al. (2016). Carbon Nanomaterials as Conductive Scaffolds to Modulate Intercellular Electron Transfer in Bacteria. *Chemical Science*, 7(5), 3326–3333.

Gómez Martínez, M. (2022, noviembre 4). Nanotecnología en la industria de los hidrocarburos. *EADIC Blog*.

Hernández, T., Acosta, S., León, H., Montalván, M., Hernández, F., & Jeréz, D. (2022). Recuperación mejorada de petróleo mediante la aplicación de procesos biotecnológicos. *Proyecto 5038, Etapa 1*. Archivo de documentos del Centro de Investigación del Petróleo.

Hilty, F., Arnold, M., Hilbe, M., Teleki, A., Knijnenburg, J. T. N., Ehrensperger, F., Hurrell, R. H., et al. (2010). Iron from nanocompounds containing iron and zinc is highly bioavailable in rats without tissue accumulation. *Nature Nanotechnology*, 5(6), 374–380.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2010.92>

Hormazabal Cruz, P. F. (2024). Desarrollo y análisis de soluciones poliméricas con nanopartículas para la recuperación mejorada de petróleo. *Universidad Nacional del Comahue*.

Hulkoti, N. I., & Taranath, T. C. (2014). Biosynthesis of nanoparticles using microbes—A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 121, 474–483.

Hussain, S., & Jaleel, M. A. (2019). Nanomaterial-incorporated culture media: A new perspective for microbial cultivation. *Critical Reviews in Microbiology*

Kadner, R. J. (1997). Cytoplasmic membrane. En F. C. Neidhardt (Ed.), *Escherichia coli and Salmonella typhimurium: Cellular and molecular biology* (2ª ed., pp. 58–87). American Society for Microbiology.

Kumar, R., et al. (2024). Polymeric nanocarriers for microbial metabolite delivery in harsh environments. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 145–158.

- Lamers, E., et al. (2021). Nano-engineered hydrogels for 3D bacterial culture. *Advanced Healthcare Materials*, 10(10), 2002167.
- Lazar, I., Petrisor, I. G., & Yen, T. F. (2007). Microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Petroleum Science and Technology*, 25(11), 1353–1366.
- Lewis, K. (2004). The coming of age of unculturable bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 58, 201–224.
- Li, Y., et al. (2020). Nano-based pH-buffering systems for improved microbial fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, 117(8), 2465–2475.
- Liu, H., Lin, H., Mu, Q., Lu, X., Wang, J., & Khan, M. N. (2014). Bioluminescence system assisted by NAD(P)H conversion to increase the sensitivity of quantitative bacterial cell assay. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 375–380.
- Mendoza Uribe, G., & López Ramírez-Luna, J. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*, 14(29), 9–36.
- Mindiola, G. L. F. M., & Rondón, A. E. (2021). Viabilidad de la aplicación de la tecnología de recuperación mejorada de petróleo con microorganismos (MEOR) en los yacimientos del campo Pílon, distrito Morichal, estado Monagas. *Ingeniería y Competitividad*, 23(2), e20710539. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.10539>
- Omoniyi, O. A. (2015). A review of microbial enhanced oil recovery: Current development and future prospects. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(6), 1378–1389.
- Pantidos, N., & Horsfall, L. (2014). Biological synthesis of metallic nanoparticles by bacteria, fungi and plants. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 5(233), 1–10.
- Pannekens, M., Müller, H., Mbow, F. T., & Meckenstock, R. U. (2019). Los yacimientos de petróleo, un hábitat excepcional para los microorganismos. *Petroleum Microbiology*, Elsevier, 1–9.
- Pfyffer, G. E. (2015). Mycobacterium: slow growing. En D. H. Persing, F. C. Tenover, J. Versalovic, Y. W. Tang, E. R. Unger, D. A. Relman, & T. J. White (Eds.), *Molecular microbiology: Diagnostic principles and practice* (pp. 583–596). ASM Press.
- Pinzón Sarmiento, L. J., & Soto Ortigón, J. S. (2024). La influencia de la nanotecnología en la recuperación mejorada del petróleo. *Universidad Industrial de Santander*.
- Quraishi, M., Bhatia, S., Pandit, S., Gupta, P., Rangarajan, V., Lahiri, D., Yang, Y.-H. (2021). Exploiting microbes in the petroleum field: Analyzing the credibility of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). *Energies*, 14(15), 4648. <https://doi.org/10.3390/en14154684>
- Rodríguez, M. (2024, abril 7). Avances en las técnicas de Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR). *Inspenet*. <https://inspenet.com/articulo/avances-tecnicas-de-recuperacion-mejorada-de-petroleo/>
- Rodríguez, J.M., Allende-Ballester, C., Cornelissen, J.J.L.M., Castón, J.R. (2021). Nanotechnological Applications Based on Bacterial Encapsulins. *Nanomaterials*, 11(6), 1467.
- Roco, M. C. (2011). The long view of nanotechnology development: The National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 427–445.
- Santos, J. R., Ferrat, G. C., & Eichelmann, M. G. (2005). La fase estacionaria en la bacteria *Escherichia coli*. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 47(3–4), 92–101.
- Sen, R. (2008). Biotechnology in petroleum recovery: The microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 714–724.
- Singh, A., et al. (2023). Nanotechnology applications in microbial enhanced oil recovery: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 220, 111–125.
- Suthar, H., Patel, A., Chaudhari, S., & Prakash, R. (2018). FTIR-based analysis of biosurfactant–nanoparticle interactions in

Artículos

microbial oil recovery systems. *Energy & Fuels*, 32(3), 3124–3132.

Wang, T., Yang, L., Zhang, B., & Liu, J. (2010). Extracellular biosynthesis and transformation of selenium nanoparticles and application in H₂O₂ biosensors. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 80(1), 94–102.

Yernazarova, A., Kayirmanova, G., Baubekova, A., & Zhubanova, A. (2016). Microbial Enhanced Oil Recovery. In *Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) - a Practical Overview*. InTech.
<https://doi.org/10.5772/64805>

Youssef, N., Elshahed, M., & McInerney, M. (2009). Microbial biosurfactants in enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and*

Engineering, 68(3–4), 135–142.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.06.009>

Zhang, Y., Wu, Y., Zhao, X., et al. (2025). Progress and challenges of functionalized bacterial encapsulation: A novel biotechnology for next-generation biotherapeutics. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 15(10), 5167–5191.

Zwietering, M., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Zwietering, M., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875–1881.