

Revista de la Sociedad Mexicana de

Biotechnología y Bioingeniería

Año 2026 Volumen 30, Número 3
ISSN 0188-4786



Sociedad Mexicana de
Biotechnología y Bioingeniería

ISSN 0188-4786, revista cuatrimestral publicada por la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C. Los artículos se encuentran en Google Académico. Certificado de Licitud de Título en trámite y Certificado de Licitud de Contenido en trámite. Reserva de derechos de Título 04-1999-082516265000-101. Los conceptos que en ella aparecen son responsabilidad exclusiva de los autores. Se prohíbe la reproducción total o parcial de su contenido sin previa autorización por escrito del Comité editorial. Toda correspondencia deberá enviarse a Km. 23.5 Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses s/n, Col. San Andrés Totoltepec, C.P. 14400, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México. o a la siguiente dirección electrónica revista_biotecnologia@smbb.mx.



MESA DIRECTIVA

2024 – 2026

Dr. Luis Bernardo Flores Cotera
Presidente

Dr. Francisco José Fernández Perrino
Vicepresidente

Dr. Manuel Alejandro Lizardi Jiménez
Secretario

Dra. Neith Aracely Pacheco López
Tesorero

Dra. Andrea Sabido Ramos
Subsecretario

Dra. Carolina Peña Montes
Subtesorero

M.C. Oscar Ulises García Flores
Vocal estudiante

M. en C. Ileana Emilia Gutiérrez Cancino
Vocal Profesional

EDITORA

Dra. María Soledad Córdova Aguilar
UNAM

Co-editor

Dr. Jorge Gracida
UAQ

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Isadora Martínez Arellano
Dra. María Eugenia de la Torre
Dra. Ileri Alejandra Carbajal Valenzuela
Dra. Andrea Sabido Ramos
Dra. Beatriz Ruiz Villafán
M. en C. Vanessa Hernández Rodríguez
Dr. Manuel Alejandro Lizardi Jiménez

Formación y edición

Pas. QA Mariana Espinoza Tapia

Índice

Instrucciones para los autores 4

Artículos

Germinación asimbiótica de semillas y desarrollo de plántulas *in vitro* de *Trichocentrum nudum* (Orchidaceae)
Daniel Hernández; Luis Ortega, Javier Beltrán, Luisa Martínez 8

Nuevas fronteras en la microencapsulación alimentaria: materiales, tecnologías emergentes y aplicaciones funcionales
Sara Abigail Vargas Castro, Héctor Ruiz-Espinosa 19

Recuperación de petróleo: El papel de la nanotecnología y bacterias autóctonas
Mary Elizabeth Sánchez Labrada, María Esther Montalván García,
Silvia Lilibet Acosta Diaz 30

Instrucciones para los autores

Guía de Autores

La revista puede recibir trabajos de investigación original, así como de revisión en los campos de la Biotecnología y Bioingeniería. Todos los manuscritos serán sujetos a revisión por al menos dos miembros del Comité Editorial y deberán contar con una recomendación de aceptación para ser publicados.

Los idiomas en los que se puede publicar en la revista son el español y el inglés.

Los trabajos se escribirán en hoja tamaño carta (21.6 cm x 27.6 cm). Los márgenes aplicados a todo el manuscrito serán de 2.5 cm para los extremos superior e inferior, así como 3 cm de cada lado. Las páginas deberán estar numeradas en la parte inferior y central de cada hoja.

Para evitar errores innecesarios se recomienda usar el corrector de gramática y ortografía del procesador de palabras. Se recomienda que los trabajos completos tengan un máximo de 25 páginas, escritas con un interlineado de 1.5 renglones, incluyendo las tablas y figuras. Las publicaciones en la revista Biotecnología están exentas de costo para los autores.

Cuando corresponda, se recomienda el uso de abreviaturas para referirse a unidades de tiempo (h, min, s), de volumen (l, ml, μ l), de peso (kg, g, mg, μ g), ADN, ARN y otras comúnmente aceptadas en la literatura científica.

Los trabajos de investigación original pueden tocar cualquiera de los diversos campos que cultivan la biotecnología y la bioingeniería, desde aspectos fundamentales hasta sus aplicaciones, incluyendo: Enzimas y Biocatálisis, Microbiología, Biotecnología Agrícola y Vegetal, Biotecnología Marina, Alimentos y bebidas, Biotecnología farmacéutica, Biotecnología Ambiental, Bioingeniería y fermentaciones, Bioenergía y biocombustibles, Biología de sistemas y bioinformática, Biología sintética, Nanobiotecnología y biomateriales, Ingeniería metabólica, Omicas, Bioseguridad y Bioética.

Tanto los trabajos de investigación original como las revisiones deberán apegarse al siguiente formato:

1. El título del manuscrito se escribirá en negritas con letra Arial o equivalente tamaño 14. El título deberá estar centrado y ser conciso e informativo. Evite el uso de abreviaciones y fórmulas.

Instrucciones para los autores

2. El nombre de los autores ocupará los siguientes renglones escribiendo el nombre y primer apellido de cada participante. Se usará letra Arial o equivalente tamaño 12. Los nombres de los participantes deberán estar centrados, señalando con un asterisco el autor responsable de la publicación. En el siguiente renglón con letra itálica Arial del mismo tamaño, se incluirá la dirección postal de la institución de adscripción de los autores, así como la dirección de correo del autor corresponsal. Si el responsable fuera un estudiante, deberá incluir una carta del tutor o director del trabajo autorizándolo.
3. Se deberá añadir un Resumen de no más de 250 palabras en español y el correspondiente Abstract en inglés.
4. Se incluirán entre 3 a 6 Palabras clave: que permitan clasificar el artículo en una base de datos. Estas palabras deberán de incluirse en español y en inglés (Key words).
5. Si el texto inicia con el nombre de algún subtema, éste de pondrá como primera línea en cursivas con letra Arial o equivalente tamaño 10. Después en el siguiente renglón se iniciará el texto descriptivo usando letra Arial o equivalente tamaño 10. El texto deberá ser escrito con un interlineado de 1.5 renglones. Se deberá dejar un espacio de un renglón al inicio de una sección o subtema nuevo. Los géneros y especies deberán escribirse en letras itálicas.
6. Las figuras deberán numerarse con arábigos, correlativamente en orden de aparición en el texto. No se integrarán al texto, sino al final del manuscrito. No obstante, para facilitar el trabajo de edición, se recomienda indicar la ubicación de las mismas en el momento en que son mencionadas por primera vez en el texto. Las figuras deben incluir un breve título explicativo en la parte inferior de la misma. Si es necesario incluir fotos, éstas se deberán designar como figuras.
7. Las tablas también se numerarán con arábigos ubicados en la parte superior de las mismas e incluirán un breve título explicativo. Las notas en las tablas deberán ser indicadas con letras minúsculas en superíndice. La ubicación de las tablas será señalada en el texto, pero se anexarán en hojas separadas y al igual que las figuras, al final del manuscrito.
8. La información dada como referencias bibliográficas deberá permitir a los lectores llegar con facilidad a la fuente de información original. En el texto del trabajo, las referencias se citan por autor y año entre paréntesis redondos. Por ejemplo: “Martínez & García (1999) han demostrado que...”, o bien, “Datos recientes (Martínez & García, 1999) han demostrado que...”. Si la cita posee varios autores se escribirá como sigue: “Gutiérrez et al. (2003), han demostrado...” O bien: “Datos recientes (Gutiérrez et al., 2003) han mostrado...”

Instrucciones para los autores

Si la cita es una página de Internet, la dirección URL deberá escribirse completa y entre paréntesis directamente en el texto.

9. La lista de Referencias se deberá escribir con el mismo tipo de letra del texto principal (Arial tamaño 10) y con sangría francesa de acuerdo con el siguiente formato:

Artículos:

Bayegan AH, Clote P (2020) RNAmountAlign: Efficient software for local, global, semiglobal pairwise and multiple RNA sequence/structure alignment. PLoS ONE 15(1): e0227177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227177>.

Libros:

Ullrich M (2009) Bacterial Polysaccharides: Current Innovations and Future Trends. Horizon Scientific Press, Norwich.

Capítulos de libros:

Sánchez S & Demain AL (2009) Metabolic regulation and overproduction of primary metabolites. In: Encyclopedia of Industrial Biotechnology. Bioprocess, Bioseparation, and Cell Technology (EIB). Flickinger MC (ed). John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ. pp. 396-458.

Patentes:

Fenical WH, Jensen PR & Kwon HC (2009) Polyol macrolide antitumor-antibiotics from the marine actinomycete strain CNQ140. US patent 7,521,414.

Congresos y reuniones:

Reyes N, Domínguez RM, Islas I & Solis S (2007) Inducción diferencial por pH y temperatura del complejo pectinolítico producido por células inmovilizadas de *Aspergillus HL*. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Morelia Mich. México. OIII-12.

Instrucciones para los autores

Sitios en internet:

CAZY, Carbohydrate-Active Enzymes Database. (<http://www.cazy.org/>)

Tesis de pre y posgrado:

Cárdenas C (2009) Evaluación del uso biotecnológico de la semilla de *Ditaxis heterantha* para la producción de safranal. Tesis Maestría en Ciencias Bioquímicas. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. pp. 1-78.

Cada autor es responsable de la precisión de las citas que emplea.

Una vez que ha sido revisado y aceptado su trabajo, los autores deberán enviar una carta de cesión de los Derechos de Autor, de manera que la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería pueda hacer uso del artículo aceptado, o parte de él, con fines de divulgación y difusión de la actividad científica y tecnológica. En ningún caso, dichos derechos afectan la propiedad intelectual que es propia de los autores, para usar la totalidad o parte de ese artículo con fines no lucrativos.

Los trabajos se someten en línea en la página electrónica de la Sociedad Mexicana de Biotecnología, en la dirección <https://smbb.mx/publicaciones/publicacion-de-articulo/>. Al momento de recibirlo, se enviará un acuse de recibo al autor correspondiente. La dirección para mantener comunicación con el editor es: revista_biotecnologia@smbb.mx y marisol.cordova@icat.unam.mx.

Una vez aceptados, los trabajos son editados y enviados a los autores para su corrección. En esta condición no se permitirán cambios sustanciales en el contenido de los mismos sin la aprobación del editor en jefe. Una vez aprobada la prueba, el trabajo se publicará en línea y podrá ser consultado en la página de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería AC <http://www.smbb.com.mx/>.

Germinación asimbiótica de semillas y desarrollo de plántulas *in vitro* de *Trichocentrum nudum* (Orchidaceae).

Asymbiotic seed germination and *in vitro* seedling development of *Trichocentrum nudum* (Orchidaceae).

¹Daniel Hernández*; ²Luis Ortega, PhD; ¹Javier Beltrán, PhD; ¹Luisa Martínez.

¹Programa de Biología, Departamento de Biología y Química, Facultad de Educación y Ciencias, Universidad de Sucre, Sincelejo-Sucre, Colombia.

²Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA), Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

dhernandezrosales@hotmail.com

Resumen

Neurospora crassa es un hongo filamentoso con gran potencial para aplicaciones biotecnológicas debido a su rápido crecimiento y fácil cultivo. En este estudio, se evaluó la capacidad de producción de la enzima invertasa a partir de este microorganismo, mediante fermentación en medio sólido (FMS) y agrolita como soporte inerte. Se evaluaron factores de crecimiento y producción enzimática relevantes como el contenido de sustrato, niveles de humedad, temperaturas de incubación y nivel de inóculo. La producción de invertasa se incrementó al incrementar la concentración de sustrato, alcanzando una actividad máxima de 10.69 ± 0.01 U/mL, empleando 90 g/L de sacarosa. De igual manera, la actividad enzimática se vio favorecida al emplear 65 % de humedad inicial en la FMS (44.56 ± 1.76 U/mL), una temperatura de 35 °C (46 ± 1.63 U/mL) y un nivel de inóculo de 1×10^8 esporas/mL (41.38 ± 1.00 U/mL). Además, se observó que la concentración de proteína varió en función de estas condiciones, con un máximo de 0.08 ± 0.01 mg/mL a 65 % de humedad inicial. Estos resultados muestran que *N. crassa* es un buen modelo de estudio para el diseño de estrategias que permitan la elección de las condiciones de cultivo en FMS, para mejorar la producción de enzimas industrialmente importantes, como es el caso de la invertasa.

Palabras Claves: Biotecnología, cultivos *in vitro*, orquídea, semillas, vitroplantas

Abstract

Trichocentrum nudum, belonging to the 'dancing ladies' group, is an orchid native to America, found in countries such as Colombia, Venezuela, and Panama. The objective of this study was to establish a viable germination protocol and evaluate the formation of *in vitro* seedlings of the *Trichocentrum nudum* orchid. To this end, 20 mature capsules of this species were used, collected in the department of Sucre, and the seeds were subsequently cultivated in three treatments: T1 (100% MS salts), T2 (50% MS salts) and T3 (25% MS salts). With regard to seed germination, the highest germination percentage and the highest number of shoots were observed in T1. For seedling formation, T2 showed the best results, with the formation of elongated stems and the presence of roots. In conclusion, the results of the present study allows to establish a protocol for seed germination and *in vitro* seedling production of this orchid, which would be a strategic component for its propagation and conservation.

Key Words: Biotechnology, *in vitro* culture, orchid, seeds, vitroplants

Introducción

Trichocentrum nudum, también conocida con otros sinónimos, tales como *Cohniella nuda* y *Oncidium nudum*, es una planta epífita perteneciente a la familia Orchidaceae, nativa de América y distribuida en países tales como Venezuela, Colombia (Hernández-Rosales y Ortega-Macareno, 2025) y Panamá, y se encuentra incluida dentro del grupo comúnmente conocido como “orquídeas

damas danzantes”. A diferencia de otras especies del género, *Trichocentrum nudum* presenta inflorescencias que son siempre más cortas que las hojas (esto puede ser relativo) y muy densas pero, lo que realmente diferencia a esta especie es su flor: el diámetro de la flor no es mayor a 3,5 cm, y estas van desde pequeñas con el labelo de unos 7 mm de longitud a más grandes con el labelo de unos 13 mm de longitud (Carnevali et al., 2010) (Figura 1).



Figura 1. Planta completa y flor de la especie *Trichocentrum nudum*. Autoría propia.

Sin embargo, a pesar de la belleza de sus flores, la diversidad de especies y la extensa distribución de las mismas, con el paso del tiempo se han venido reportando diversos factores bióticos, abióticos y antropogénicos que afectan negativamente a las orquídeas (Carranza et al., 2023); entre los factores bióticos que afectan a la distribución, dispersión de semillas y supervivencia de las orquídeas se encuentra la necesidad de entablar relaciones interespecíficas, ya que se ven sujetas a la disponibilidad de microorganismos (Fernández, 2010), perjudicando las principales interacciones de las orquídeas, como la relación con hongos asociados, que desde el momento de la germinación benefician a las orquídeas, debido a que sus semillas carecen de endospermo, por lo cual, necesitan obligatoriamente un microorganismo que les facilite los nutrientes, agua y demás elementos para que se lleve a cabo la

germinación (Meng et al., 2019). Por otra parte, en la etapa de adultez, las orquídeas pueden recibir ayuda de los hongos, facilitándoles la obtención de nutrientes para su crecimiento, procesos fenológicos (tales como floración y formación de frutos) y ayudando en su resguardo contra microorganismos patógenos (Sathiyadash et al., 2020).

En ese orden de ideas, otros factores, como los abióticos, repercuten de manera trascendental en la conservación de las orquídeas, siendo el cambio climático una de las principales amenazas para las plantas (Seaton et al., 2013; Faleiro et al., 2018), afectando significativamente las poblaciones de orquídeas debido a la poca disponibilidad de nutrientes, humedad, estructura del suelo, pH y afectando las relaciones simbióticas, con hongos y polinizadores. El cambio climático disminuye en mayor medida la disponibilidad

de un hábitat adecuado para las orquídeas, propiciando el aumento de las amenazas existentes como la sequía, incendios y propagación de malezas y demás especies invasoras (Werner y Gradstein, 2008; Seaton et al., 2013).

Finalmente, entre los factores antropogénicos se encuentran la alteración, pérdida y degradación del hábitat, la tala de árboles, y la extracción de orquídeas silvestres para su comercio ilegal (Puris et al., 2023). Las poblaciones de orquídeas silvestres se ven afectadas por las presiones del desarrollo humano, como la conversión de tierras para agricultura o ganadería y la recolección ilegal de plantas de sus hábitats como plantas ornamentales para la comercialización en los mercados nacionales e internacionales (Hinsley et al., 2017).

Ante estas problemáticas, el campo de la biotecnología aporta herramientas y métodos de vital importancia para la conservación de especies, donde resalta el cultivo *in vitro* de tejidos vegetales como una de las más utilizadas. Esta técnica favorece la multiplicación masiva de plantas en un corto período de tiempo y a costos reducidos (Ancasi-Espejo et al., 2023) a partir de protocolos de establecimiento de explantes que promueven procesos como la organogénesis (Campos et al., 2020; Duarte, 2022). La técnica de cultivos *in vitro* ha sido implementada satisfactoriamente en una gran variedad de especies vegetales, incluyendo orquídeas terrestres, epífitas y litófitas, por medio de la germinación asimbiótica de semillas y la formación de las estructuras conocidas como protocormos (Mamani et al., 2022; Hernández et al., 2023).

Aunque se tiene registro de múltiples estudios sobre germinación *in vitro* de semillas de orquídeas, para *Trichocentrum nudum* aún no han sido descritos sus requerimientos nutricionales y fisiológicos básicos, ni la posible respuesta de las semillas a variaciones en la concentración del medio de cultivo comúnmente implementado para orquídeas. Puesto que las semillas de estas plantas no poseen endospermo (tejido de

reserva propio de todas las semillas), factores como la disponibilidad y la concentración de nutrientes del medio pueden alterar significativamente los procesos de imbibición, la reactivación metabólica, procesos de división celular y el desarrollo inicial del protocormo (Apolo, 2021). De esta manera, aún con cambios simples (como modificaciones en las concentraciones del medio de cultivo) se puede generar información relevante sobre la eficiencia del desarrollo del protocormo, el nivel mínimo o máximo de nutrientes requeridos por las semillas para concretar la germinación, la posible inhibición por exceso de sales y la sensibilidad de la planta a las condiciones osmóticas del medio (Wongsa et al., 2025).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo fue establecer un protocolo de germinación viable y evaluar la formación de plántulas *in vitro* de la orquídea *Trichocentrum nudum*.

Materiales y Métodos

Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Biotecnología y Cultivo de Tejidos Vegetales de la Universidad de Sucre, sede Puerta Roja. Esta se ubica en la ciudad de Sincelejo, cuya posición geográfica en Colombia es 9° 18' de latitud norte y 75° 23' de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

Obtención y recolección del material vegetal

Se hizo uso de 20 cápsulas maduras de *Trichocentrum nudum* (Figura 2), las cuales fueron recolectadas en el municipio de Sampues, Sucre, y los puntos de recolección se encuentran representados por las coordenadas: 9,19942 de latitud y -75,34284 de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Para la recolección del material vegetal, se desplazó hacia el lugar de ubicación de las mismas, se hizo uso de papel periódico y bolsas ziploc y se transportaron las cápsulas hacia la Universidad de Sucre, en donde se les realizó el respectivo tratamiento de desinfección.



Figura 2. Cápsulas maduras de *Trichocentrum nudum*. Autoría propia.

Desinfección del material vegetal

Las cápsulas se desinfectaron mediante el lavado por inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2%, durante 3 minutos con dos gotas de Tween 20 (Sigma®), posteriormente se realizó dos enjuagues con agua destilada esteril para eliminar el exceso de detergente.

Medios de cultivo

Se realizó un total de 3 tratamientos (T1, T2 y T3), donde cada tratamiento estuvo conformado por 20 réplicas, para un total de 60 medios de cultivo. Los tratamientos estuvieron compuestos por sales MS (1962) al 100% para T1, para T2 sales MS (1962) al 50% y para T3 sales MS (1962) al 25%, y para todos los tratamientos sacarosa al 3%, 0,05 gr de Myo-inositol, 500 μ l de tiamina HCl, Gelrite al 0,2%, y se ajustó el pH a $5,7 \pm 5,8$. Luego se disolvió el Gelrite durante 10 minutos en una plancha de calentamiento y se distribuyó

en frascos de vidrio a razón de 20 ml por frasco. Finalmente, se esterilizó en autoclave durante 20 min a 15 psi y 121° C. Los medios de los diferentes tratamientos se sembraron en condiciones de asepsia en cabina de flujo laminar horizontal.

Siembra del material vegetal, germinación de las semillas y condiciones del medio

Se cortaron las cápsulas longitudinalmente con la ayuda de un bisturí previamente desinfectado dentro de la cámara de flujo laminar, se extrajo un cúmulo de semillas y se sembró en los diferentes medios de cultivo distribuyéndolas en cinco grupos dentro del frasco con la ayuda de una asa de aro (Figura 3). Posteriormente, se colocaron en un cuarto de incubación a una temperatura de $28 \pm 5^\circ$ C, humedad relativa de 65 % y un fotoperiodo de 12 horas luz con una intensidad lumínica de $50 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.



Figura 3. Siembra de las semillas de *Trichocentrum nudum*.

Evaluación del material vegetal

Se evaluó el desarrollo germinativo de las semillas en cada uno de los medios a las 24 horas, 48 horas, 72 horas, 5 días, 10 días, 15 días, 20 días, 30 días, 40 días, 45 días, 50 días, 60 días, 70 días y 90 días. Al mismo tiempo, se evaluarán parámetros cuantitativos y cualitativos, tales como el mejor tratamiento para la germinación, número de semillas germinadas, longitud del vástago, número de raíces, número de brotes y presencia o ausencia de contaminación.

Diseño y análisis estadístico

Esta investigación se realizó bajo un diseño completamente al azar (DCA). A los datos que se obtuvieron se les aplicaron las pruebas de normalidad (ShapiroWilk) y homogeneidad de varianzas (Bartlett), tras lo cual, aquellas variables distribuidas de forma normal y homogénea fueron sometidas a un análisis de

varianza (ANOVA), seguido de la prueba de comparación múltiples de medias Tukey (α : 0.05), mientras que en caso contrario se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. Todos los análisis estadísticos se procesaron en programas tales como Excel, R Project y R Studio para Windows 11 (de Mendiburu, 2012).

Resultados y discusión

Este trabajo encontró que, al transcurrir aproximadamente 50 días después de la siembra de las semillas, fue posible observar inicios de germinación en los medios de cultivo, observándose así la estructura conocida como protocormo globular y los primeros brotes en diferentes réplicas de los distintos tratamientos implementados (Vargas et al., 2023) (Figura 4).

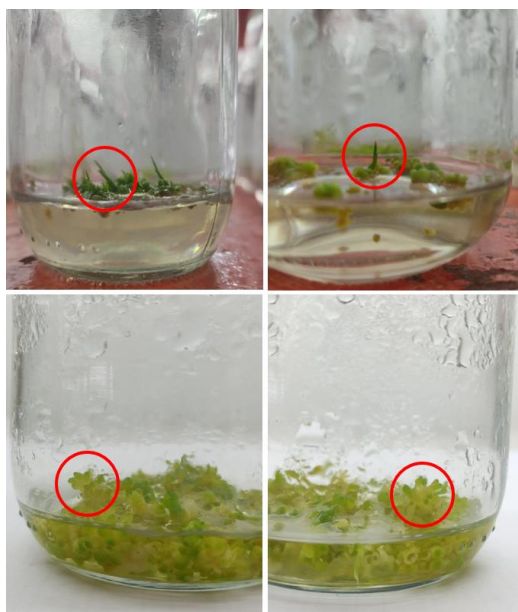


Figura 4. Semillas germinadas *in vitro* y formación de brotes de la orquídea *Trichocentrum nudum*.

Los resultados obtenidos se relacionan con los de Vogel y Macedo (2010), los cuales evaluaron el efecto del ácido indol-3-acético (IAA), el tiazurón (TDZ) y la calidad de luz en la germinación de semillas de *Cyrtopodium glutiniferum*, reportando inicios de germinación a los 50 días después de la siembra de las semillas. De igual manera, Wida et al. (2017) afirman que, en *Dendrobium lasianthera*, la germinación asimbiótica se dio a las seis semanas (42 días), tiempo en el que el embrión mostró crecimiento constante, la testa se rompió y el

embrión emergió. Así mismo, Moreno y Menchaca (2007) evaluaron el efecto de compuestos orgánicos adicionados al medio MS en la germinación de *Stanhopea tigrina* y registraron que, alrededor de los 60 días, se observó la formación de protocormos de 0.5 cm con rizoides y primordios foliares. Sin embargo, se reportan diferencias al hacer la comparación de estos resultados con otras especies del mismo género. Ramos et al. (2020), en un estudio de propagación clonal de *Trichocentrum stramineum*, registraron germinación a los 20 días después de la

siembra de las semillas en medio KC-E, mientras que Flores et al. (2008) registraron para la misma especie el desarrollo de protocormos a los 13 días en medios MS suplementados con peptona, sacarosa, agua de coco y extractos de frutas. De la misma manera, Álvarez (2012) observó en *Trichocentrum pachyphyllum* germinación transcurridos 15 días en medio Peter, y con el medio KM, en el cual la germinación no se dio sino hasta los 60 días.

En ese orden de ideas, el análisis de varianza para el número de semillas germinadas demuestra que hay diferencias significativas entre dicha variable y los tratamientos (p -valor=0.02307, $p < 0.05$) (Figura 5).

NSG VS. TRATAMIENTOS

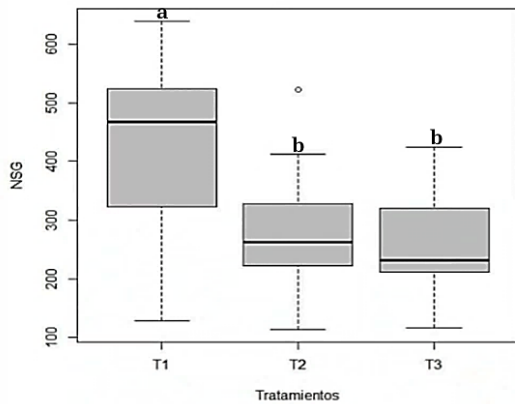


Figura 5. Número de semillas germinadas con respecto a los tratamientos.

El análisis de varianza para el número de raíces demuestra que hay diferencias significativas entre esta variable y los tratamientos (p -valor=0.01084, $p < 0.05$) (Figura 6).

NR VS. TRATAMIENTOS

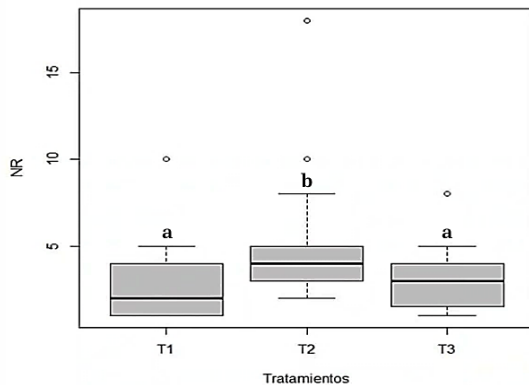


Figura 6. Número de raíces con respecto a los tratamientos.

El análisis de varianza para el número de brotes demuestra que hay diferencias significativas entre la variable en cuestión y los tratamientos (p -valor=0.02215, $p < 0.05$) (Figura 7).

NB VS. TRATAMIENTOS

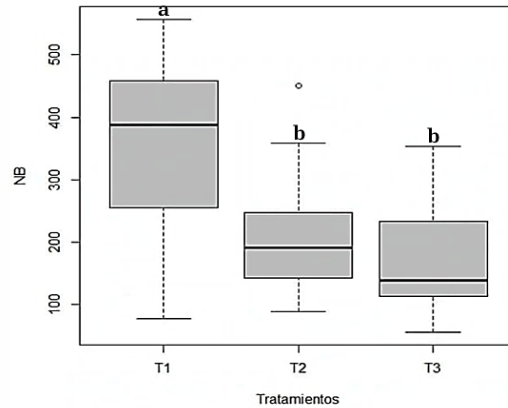


Figura 7. Número de brotes con respecto a los tratamientos.

El análisis de varianza para la longitud del vástago demuestra que no hay diferencias significativas entre dicha variable y los tratamientos (p -valor=0.286, $p > 0.05$) (Figura 8).

LV VS. TRATAMIENTOS

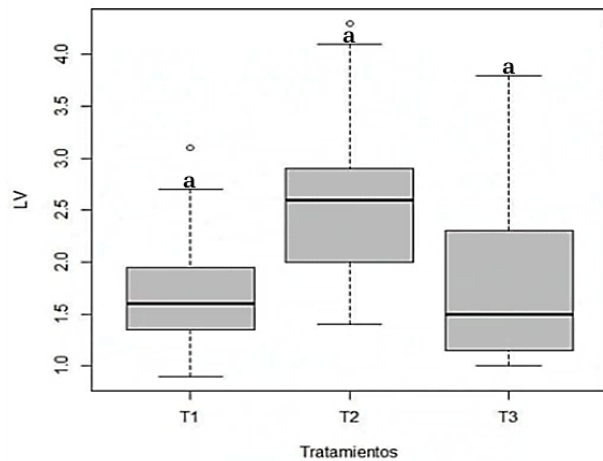


Figura 8. Longitud del vástago con respecto a los tratamientos.

Por otro lado, después de aproximadamente 120 días después de la siembra de las semillas, es posible evidenciar diferencias significativas principalmente en cuanto al crecimiento y elongación de las vitroplantas y la formación de raíces (Figura 9).

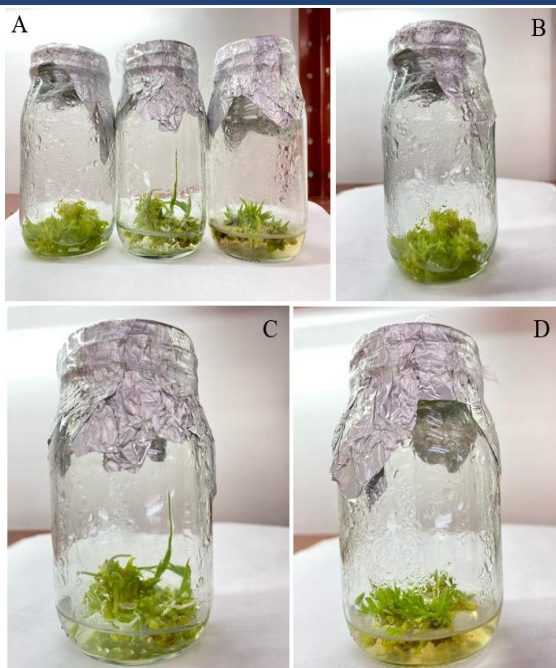


Figura 9. A. Vitroplantas después de 120 días post-siembra. B. Vitroplantas en T1. C. Vitroplantas en T2. D. Vitroplantas en T3.

Los resultados obtenidos para *Trichocentrum nudum* permiten detallar que, hasta el último de los controles, el porcentaje de germinación fue del 92% en T1, 52% en T2 y en T3, el porcentaje de germinación fue del 48%. Estos hallazgos confirman que la germinación de semillas, la formación de brotes, el desarrollo radicular y la elongación del vástago se da más eficientemente en los tratamientos T1 (sales MS al 100%) y T2 (sales MS al 50%), mientras que en T3 (sales MS al 25%) se pudo observar deficiencias claras en todos los parámetros. Estas observaciones se comparan con lo registrado por Romero et al. (2007), los cuales afirman que tanto el 100% como el 50% de sales minerales propicia un mayor desarrollo de plántulas en orquídeas, hallazgos que se asemejan considerablemente con los del presente trabajo. Del mismo modo, Rangel et al. (2018), en su trabajo con *Anthurium schlechtendalii* (anturio), registraron que ambas concentraciones de sales (50% y 100%) promueven la germinación, aunque el mayor crecimiento se alcanzó con el 100% de sales MS suplementadas con sacarosa. Sin embargo, para la especie de *T. nudum*, los resultados afirman que tanto la concentración completa como la reducida a la mitad son favorables, dependiendo de parámetro evaluado, ya que para el número de brotes, el

T1 (100%) mostró los mejores resultados, mientras que para el número de raíces, los resultados más eficientes fueron obtenidos con T2 (50%). En este estudio, el T3 (25%) fue el tratamiento que mostró menor efectividad para lograr la germinación de las semillas; este comportamiento observado puede ocurrir debido a la baja disponibilidad de macro y micronutrientes en los medios de cultivo, componentes fundamentales en el proceso de división celular, metabolismo energético y síntesis/transporte de hormonas, tal como lo reportan Cadavid y Salazar (2008) para la especie *Cattleya quadricolor*, en donde el tratamiento 3 con sales MS $\frac{1}{4}$ (25%) arrojó un porcentaje de germinación de semillas bajo en comparación con los tratamientos 1 (100%) y 2 (50%), donde estos fueron de 88% y 64%, respectivamente. Según lo anterior, Martínez et al. (2015) afirman que la disminución de la concentración de sales puede afectar el potencial osmótico, dificultando la absorción de nutrientes y reduciendo la eficiencia de la actividad metabólica de las plántulas.

Es importante considerar que, en otras especies, como la pitahaya, se ha evidenciado un efecto opuesto y resultados contradictorios a los obtenidos en *T. nudum*: Loja y Villalba (2024) registraron imbibición total de la germinación en el medio MS al 100%, lo que viene dado por el bajo potencial hídrico proveniente de la alta concentración de sales, condición que asemeja ambientes con déficit hídrico (Tombion et al., 2023; Lamz y Gonzáles, 2013). Sin embargo, en *T. nudum* este aspecto no se observó, lo que quiere decir que existen diferencias interespecificas en la tolerancia a la salinidad del medio de cultivo. En ese orden de ideas, estudios en *Trichocentrum stramineum* evidencian variaciones en la respuesta: Ramos et al., (2020) observaron que el medio KC-E permitió una germinación significativamente superior frente al medio MS, lo que se explica por el efecto inhibitorio de la alta concentración de sales en este último (Flores et al., 2008).

Otros estudios con orquídeas soportan esta aseveración. Andrade et al. (2015) observaron que semillas cultivadas en MS al 25% mostraron síntomas de deficiencia nutricional, lo que coincide también con lo reportado en *T. nudum* bajo T3. Morard y Henry (1998) y Navarro et al (2000) también resaltan que tanto la disminución como el exceso del potencial osmótico del medio afectan la absorción de agua y nutrientes,

condicionando el crecimiento. Por el contrario, en T1 (100%) se obtuvo el mayor número de brotes, lo cual se asemeja con lo reportado por Téllez et al. (2024) en *Rhyncholelia glauca* y por Mora et al. (2023) en *Prostechea vitellina*, donde el medio MS completo produjo un mayor número de brotes por explante. Estas semejanzas resaltan que, en determinadas especies de orquídeas, la composición completa de nutrientes del MS resulta adecuada para la estimulación de la organogénesis.

Por otro lado, la elongación del vástago en *T. nudum* fue más eficiente en T2 (50%), lo que se relaciona con lo descrito por Flores et al. (2017) y Frausto et al. (2019), quienes observaron que la reducción de sales al 50% promueve la elongación de brotes y mejora la viabilidad de explantes en orquídeas, como *Phalaenopsis*. Este hallazgo sugiere que, aunque el medio MS completo aporta nutrientes suficientes, la reducción a la mitad de su concentración puede disminuir los efectos osmóticos negativos, provocando así un crecimiento más equilibrado. Además, se debe considerar que las orquídeas, al estar adaptadas a ambientes con bajos niveles de nutrientes, presentan un bajo requerimiento mineral (Frausto et al., 2019), por lo que la elección de la concentración adecuada es fundamental para optimizar la germinación y el crecimiento *in vitro*.

Finalmente, se hace la aclaración de que, en este estudio, la contaminación no representó un inconveniente, ya que en ninguno de los medios de cultivo evaluados se presentó indicios de proliferación de hongos o bacterias durante el tiempo de evaluación estipulado, permitiendo que los ensayos se realizaran de manera satisfactoria y que los parámetros analizados reflejaran con mayor precisión la respuesta a los tratamientos implementados. En síntesis, la presente investigación confirma que la respuesta de *T. nudum* a las concentraciones de sales MS depende del parámetro a evaluar. Por un lado, mientras que el medio completo (T1) favorece la brotación, el medio al 50% (T2) promueve una elongación más eficiente del vástago, y el medio reducido al 25% (T3) resulta limitante e inadecuado para la germinación y crecimiento de las vitroplántulas. Estos resultados hacen énfasis en la importancia de ajustar la concentración de sales al requerimiento fisiológico propio de cada especie, evitando tanto la deficiencia como el exceso de

nutrientes. Se sugiere explorar combinaciones dinámicas de otros medios, en pro de observar la respuesta de esta orquídea ante tales condiciones. Asimismo, se recomienda complementar el medio MS con fuentes adicionales de carbono y reguladores de crecimiento, a fin de potenciar la formación de plántulas vigorosas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que la germinación y el desarrollo *in vitro* de *T. nudum* dependen directamente de la concentración de sales del medio MS, siendo las concentraciones completas (100%) y reducidas al 50% las más favorables según el parámetro evaluado. El medio MS al 100% estimuló principalmente la formación de brotes, mientras que al 50% permitió una elongación más equilibrada del vástago, en tanto que la reducción al 25% resultó ineficiente para todas las fases del desarrollo. Estos hallazgos resaltan la posibilidad de establecer un protocolo para el establecimiento *in vitro* de esta especie y su posterior proceso de micropropagación.

Referencias

- Álvarez, C. (2012). Estudio del efecto hormonal y de compuestos orgánicos en el cultivo *in vitro* de la orquídea *Trichocentrum pachyphyllum* (hook.) R. Jiménez & Carnevali. Tesis de Licenciatura. UNAM. FES Zaragoza. México. 88 pp.
- Ancasi-Espejo, R., Alcázar-Vivado, J. & Muñoz-Guzmán, I. (2023). Concentraciones de ácido indolbutírico para la formación de raíces en condiciones *in vitro* de castaña (*Bertholletia excelsa* bonpl., Lecythidaceae). UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria, 7(1), 17–22. <https://doi.org/10.47230/unesciencias.v7.n1.2023.660>
- Andrade, M., Vargas, J., Villegas, O., López, V., Guillen, D. & Alia, I. (2015). Germinación de semillas y crecimiento de plántulas de *Cattleya* (*Brassolaeliocattleya*) *in vitro*. Interciencia 40: 549-553.
- Apolo, K. (2021). Evaluación de procedimientos en la conservación y germinación *in vitro* de semillas de la orquídea *Epidendrum nocturnum* (Jacq).

Artículos

Guayaquil, Ecuador: Universidad Agraria del Ecuador, p 30-31.

Cadavid, I.; Salazar, S. (2008). Micropropagación de *Cattleya quadricolor*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT, p30-32.

Campos, J., Arteaga, M., Campo, S., Chico, J. & Cerna, L. (2020). Establecimiento de un protocolo de desinfección y micropropagación *in vitro* de "caoba" *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae). *Arnaldoa*, 27(1), 141- 156. <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v27n1/2413-3299-arnal-27-01-141.pdf>

Carnevali, G., Cetzál, W., Balam, R. & Romero, G. (2010). A synopsis of *Cohniella* (Orchidaceae, Oncidiinae). *Brittonia*, 62 (2), 2010, pp. 153-177. https://www.researchgate.net/publication/226354887_A_synopsis_of_Cohniella_Orchidaceae_Oncidiinae

Carranza, C., Morales, A., Cruz, D., Torres, D. & Maldonado, J. (2023). Orquídeas: amenazas de su existencia, formas de conservación y protección. Jandiekua – Revista Mexicana de Educación Ambiental, p 46. ISSN 2683-1651. https://www.researchgate.net/publication/381316659_Orquideas_amenazas_de_su_existencia_formas_de_conservacion_y_proteccion

De Mendiburu, F. (2012). Manual rápido de uso de la librería agricolae. Universidad Nacional Agraria La Molina. 60 p.

Duarte, E. (2022). Regeneración de yemas adventicias en segmentos de hojas y entrenudos de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. *Colombia forestal*, 25(1), 67-76. <https://doi.org/10.14483/2256201X.17767>

Faleiro FV, Nemésio A, Loyola R. (2018). Climate change likely to reduce orchid bee abundance even in climatic suitable sites. *Global Change Biology* 24: 2272-2283. https://www.researchgate.net/publication/323529128_Climate_change_likely_to_reduce_orchid_bee_abundance_even_in_climatic_suitable_sites

Fernández, K. (2010). Micorrización *in vitro* e *in vivo* de plántulas de papa (*Solanum*

tuberosum var. Alfa). *Cultivos tropicales*, 31, 2-21.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362010000200004

Flores, G., Legaria, J., Gil, I., & Colinas, M. (2008). Propagación *in vitro* de *Oncidium stramineum* Lindl., una orquídea amenazada y endémica de México. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 14(3), 347-353. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2008000300017&lng=es&tlng=es.

Flores, L., Robledo, A. & Jimarez, M. (2017). Medio de cultivo y sustitutos del agar en el crecimiento *in vitro* de orquídeas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.8 Núm.6 14 de agosto - 26 de septiembre, 2017 p. 1315-1328. https://www.researchgate.net/publication/330307281_Culture_medium_and_agar_substitutes_for_in_vitro_growth_of_orchids

Frausto, K., Ojeda, M., Alvarado, O., García, E., Rodríguez, H. & Rodríguez, G. (2019). Inducción de brotes a partir de varas florales de la orquídea *Phalaenopsis* spp. (Blume) *in vitro*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* volumen 10 número 6 14 de agosto - 27 de septiembre, 2019. https://www.researchgate.net/publication/336053759_Induccion_de_brotes_a_partir_de_varas_florales_de_la_orquidea_Phalaenopsis_spp_Blume_in_vitro

Hernández-Rosales, D. & Ortega-Macareno, L. (2025). Muestreo y recolección de *Cyrtopodium schargellii* y *Trichocentrum nudum*, dos orquídeas epífitas presentes en el municipio de Sampués. Universidad de Sucre. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15472/rix1ig> accessed via GBIF.org on 2025-08-25. <https://gbif.org/occurrence/5219767302>

Hernández, F., Iracheta, L., Damon, A., Fernández, S. & Guillén, K. (2023). Efecto del medio de cultivo y escotoperiodo en la germinación de semillas y crecimiento *in vitro* de *Guarianthe skinneri* (Bateman) Dressler & W.E. Higgins (Orchidaceae). *Polibotánica*, (56), 151-170. Epub 18 de septiembre de 2023.

Artículos

<https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.8>

Hinsley, A., Nuno, A., Ridout, M., John, F. & Roberts, D. (2017). Estimating the extent of CITES noncompliance among traders and end-consumers; lessons from the global orchid trade. *Conservation Letters*, 10, 602-609.

https://www.researchgate.net/publication/309585962_Estimating_the_Extent_of_CITES_Noncompliance_among_Traders_and_End-Consumers_Lessons_from_the_Global_Orchid_Trade

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442023000100041

Lamz, A. & González, M. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362013000400005&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Loja, R. & Villalba, R. (2024). Establecimiento de un protocolo de propagación in vitro de pitahaya (*Hylocereus megalanthus*) para la obtención de plantas completas. Tesis para obtener el título de Ingeniero Biotecnólogo. Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Carrera de Biotecnología.

Mamani, B., Muriel, A., Maquera, A. & Nova, M. (2022). Germinación *in vitro* de *Epidendrum secundum* con diferentes agentes gelificantes y concentraciones de agua de coco. *Acta Nova*, 10(3), 345-359. Epub 31 de marzo de 2022. Recuperado en 13 de noviembre de 2024, de

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892022000100345

Martínez, Y., Andrade, M., Colinas, M., Villegas, Ó., Castillo, A., Alía, I. (2015). Efecto de las sales inorgánicas del medio de cultivo en el crecimiento de pascuíta (*Euphorbia leucocephala* Lotsy). *Revista fitotecnia mexicana*, 38 (4), 369-374.

Meng, Y. Y., Zhang, W. L., Selosse, M. A., Gao, J. Y. (2019). Are fungi from adult orchid roots the best symbionts at germination? A case study. *Mycorrhiza*, 29, 541-547.

https://www.researchgate.net/publication/334500491_Are_fungi_from_adult_orchid_roots_the_best_symbionts_at_germination_A_case_study

Mora-Cruz, Y., López-Peralta, M., Hernández-Meneses, E. & Cruz-Huerta, N. (2023). *In vitro* regeneration of *Prosthechea vitellina* (Lindley) W. E. Higgins plants by direct organogenesis. *Revista Fitotecnia Mexicana* 46:33-40, <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.1.33>

Morard P. and M. Henry (1998) Optimization of the mineral composition of *in vitro* culture media. *Journal of Plant Nutrition* 21:565-1576.

Moreno, D. & Menchaca, R. (2007). Efecto de los compuestos orgánicos en la propagación *in vitro* de *Stanhopea tigrina* Bateman (Orchidaceae). *Foresta Veracruzana*, vol. 9, núm. 2, 2007, pp. 27-32. Recursos Genéticos Forestales, México.

https://www.researchgate.net/publication/268577540_Efecto_de_los_complejos_organicos_en_Stanhopea_tigrina

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.

<https://doi.org/10.1111/j.13993054.1962.tb08052.x>

Navarro, J., Botella, M., Cerdá, A. & Martínez, V. (2000). Effects of salinity x calcium interaction on cation balance in melon plants grown under two regimes of orthophosphate. *Journal of Plant Nutrition*. 23:991-1006.

Puris, J., Rios, K. & Villena, T. (2023). En peligro por su belleza: Pérdida de Orquídeas. *Yotantsipanko*, 3(1), 63-79.

<https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v3i2.36>

Ramos, S., Rangel, L., Pedraza, M., Chávez, V., Martínez, J., Sánchez, N., & Martínez, A. (2020). Clonal propagation of *Trichocentrum stramineum* (Orchidaceae), a threatened species endemic to Mexico. *Botanical Sciences*, 98(2), 355-365. Epub 03 de septiembre de 2020.

<https://doi.org/10.17129/botsci.2468>.

Artículos

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-42982020000200355

Rangel, S., Hernández, E., CanulKú, J., Barrios, E., López, M. & Tapia, L. (2018). *In vitro* germination, seed viability and organogenesis of *Anthurium schlechtendalii* Kunth subsp. *schlechtendalii*. *Revista Bio Ciencias* 5(nesp2), e475.
<https://doi.org/10.15741/revbio.05.nesp.e475>
<https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/475/pdf>

Recuperado de:

<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/22923/38225>

Romero, R., Luna, B., Barba, A. (2007). Uso de complejos comerciales como sustitutos de componentes del medio de cultivo en la propagación *in vitro* de *Laelia anceps*. *Lankesteriana* 7:353-356.

Sathiyadash, K., Muthukumar, T., Karthikeyan, V. & Rajendran, K. (2020). Orchid mycorrhizal fungi: structure, function, and diversity. In: *Orchid biology: recent trends & challenges*. Springer (Singapore). p.239-280.
https://doi.org/10.1007/978-981-32-9456-1_13

Seaton, P., Kendon, J., Pritchard, H., Puspitaningtyas, D. & Marks, T. (2013). Orchid conservation: The next ten years. *Lankesteriana*. 13 (1-2): 93-101. 2013.
<10.15517/lank.v0i0.11545>.
https://www.researchgate.net/publication/269563235_Orchid_conservation_The_next_ten_years

Téllez, J., López, M., Hernández, E. & Cruz, N. (2024). Organogénesis directa de brotes a partir de plántulas de *Rhyncholelia glauca* (Lindley) Schlechter germinadas *in vitro*. *Revista fitotecnía mexicana*, 47(3), 293-300. Epub 04 de marzo de 2025.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2024.3.293>.

Tombion, L., Coviella, M., Pannunzio, M., Soto, M. & Bologna, P. (2023). Germinación *in vitro* de *Calibrachoa thymifolia* y *Calibrachoa missionica* nativas de la Argentina. *Revista Tecnología En Marcha*.

<https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6142>

Vargas, B., Corredor, J., Pescador, R., Montoya, F., Dal-Vesco, L. & Mamoru, R. (2023). Morpho-anatomy of *in vitro* germination and cryopreservation of the orchid *Cattleya crispa* (Orchidaceae) Morfoanatomía de la germinación *in vitro* y criopreservación de la orquídea *Cattleya crispa* (Orchidaceae). *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e52338.
<https://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71i1.52338>

Vogel, I. & Macedo, A. (2011). Influence of IAA, TDZ, and light quality on asymbiotic germination, protocorm formation, and plantlet development of *Cyrtopodium glutiniferum* Raddi., a medicinal orchid. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 104: 147-155.
https://www.researchgate.net/publication/227314204_Influence_of_IAA_TDZ_and_light_quality_on_asymbiotic_germination_protocorm_formation_and_plantlet_development_of_Cyrtopodium_glutiniferum_Raddi_a_medicinal_orchid

Werner, F. & Gradstein, S. (2008). Seedling establishment of vascular epiphytes on isolated and enclosed forest trees in an Andean landscape, Ecuador. *Biodivers. Conserv.* 17, 3195-3207.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-008-9421-5>

Wida, E., Hariyanto, S. & Wulan, Y. (2017). *In vitro* propagation of the endangered medicinal orchid, *Dendrobium lasianthera* J.J.Sm through mature seed culture. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. Volume 7, Issue 5, May 2017, Pages 406-410.
<https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.01.011>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S222116911630346X>

Wongsa, T., Piapukiew, J., Kuenkaew, K., Somsanook, C., Sapatee, O., Linjikao, J., Kunakhonnuruk, B. & Kongbangkerd, A. (2025). Asymbiotic Seed Germination and *In Vitro* Propagation of the Thai Rare Orchid Species; *Eulophia bicallosa* (D.Don) P.F.Hunt & Summerh. *Plants* 2025. 14 (14), 2212.
<https://doi.org/10.3390/plants14142212>

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

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

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

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

Resumen

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

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

Abstract

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

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

Introducción

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

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

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

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

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

Microencapsulación

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

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

Métodos de microencapsulación

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

Emulsiones

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

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

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

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

Artículos

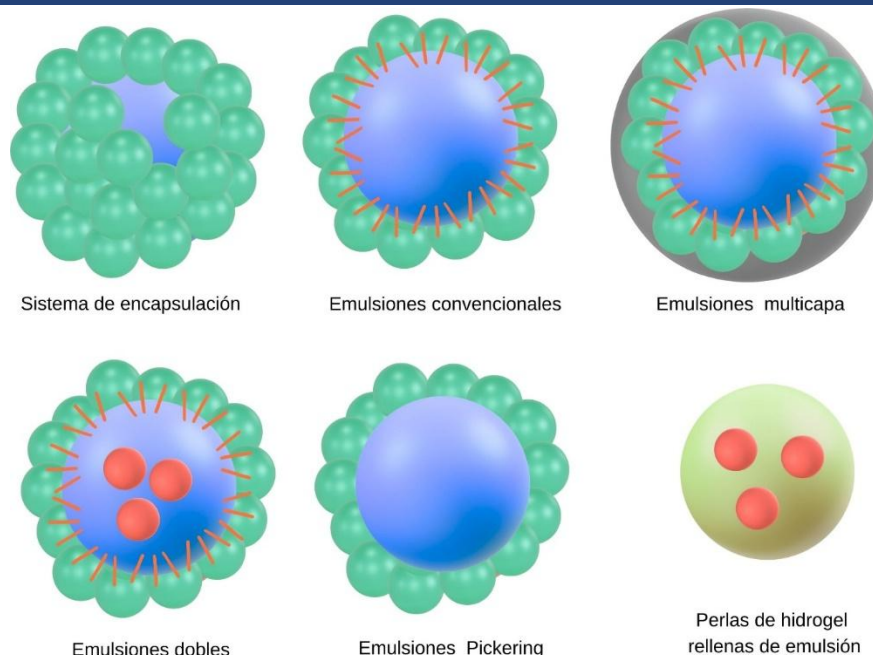


Figura 1. Sistemas de encapsulación por emulsiones

Coacervación

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

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

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

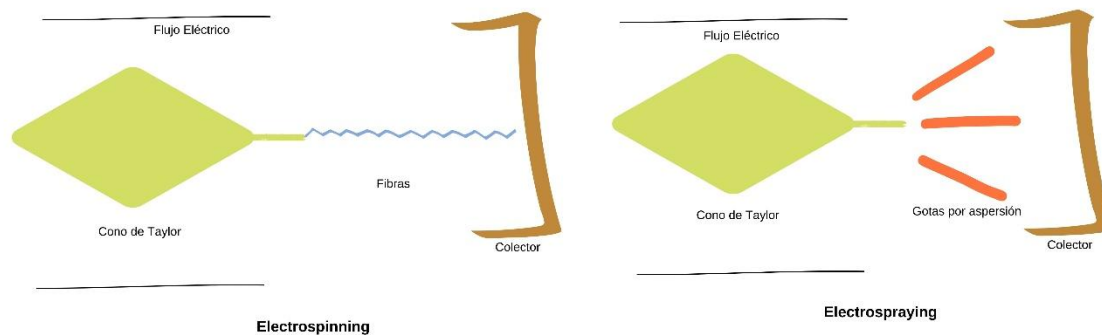


Figura 2. Sistemas de coacervación compleja

Secado por aspersión

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

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

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

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

Liofilización

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

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

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

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

Co- encapsulación

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

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

Gelificación iónica

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

Gelificación externa o extrusión

El método de extrusión consta de tres etapas principales. Primero, se dispersa el material del núcleo en una solución que contiene el material de recubrimiento, generalmente un hidrocoloide. Luego, esta mezcla se proyecta en forma de pequeñas gotas a través de una aguja fina u otro dispositivo de goteo controlado. Finalmente, las gotas se introducen en una solución gelificante o deshidratante (por ejemplo, una solución de calcio en el caso del alginato), donde ocurre la gelificación externa o reticulación del polímero, formando microcápsulas sólidas. Esta técnica se ha aplicado principalmente a la encapsulación de probióticos, aunque también se utiliza para sabores, enzimas y proteínas. Durante el proceso, el agente reticulante penetra desde el exterior hacia la solución de polielectrolitos, promoviendo la formación de la cápsula. El tamaño final de las microesferas está influenciado por factores como la viscosidad, el caudal y la concentración de la solución polimérica, así como por su temperatura, el diámetro del orificio de extrusión y la altura o distancia entre el orificio y la solución reticulante (García et al., 2024; Ma et al., 2025; Misra et al., 2021).

Si bien este procedimiento es especialmente eficaz para encapsular compuestos termosensibles o inestables frente a disolventes agresivos, y puede realizarse bajo condiciones anaeróbicas, presenta limitaciones como la dificultad para producir microcápsulas menores a 500 μm , la necesidad de boquillas de gran diámetro y la baja velocidad de producción, lo que complica su escalado. Para superar estos inconvenientes, se han desarrollado diversas variantes tecnológicas. Por ejemplo, el granulado forma gotas en condiciones ambientales controladas mediante vibración o pulsación de la boquilla. La extrusión de flujo coaxial o electrostática utiliza un campo

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

Gelificación interna

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

Emulsiones Pickering

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

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

Métodos de encapsulación electrohidrodinámica

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

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

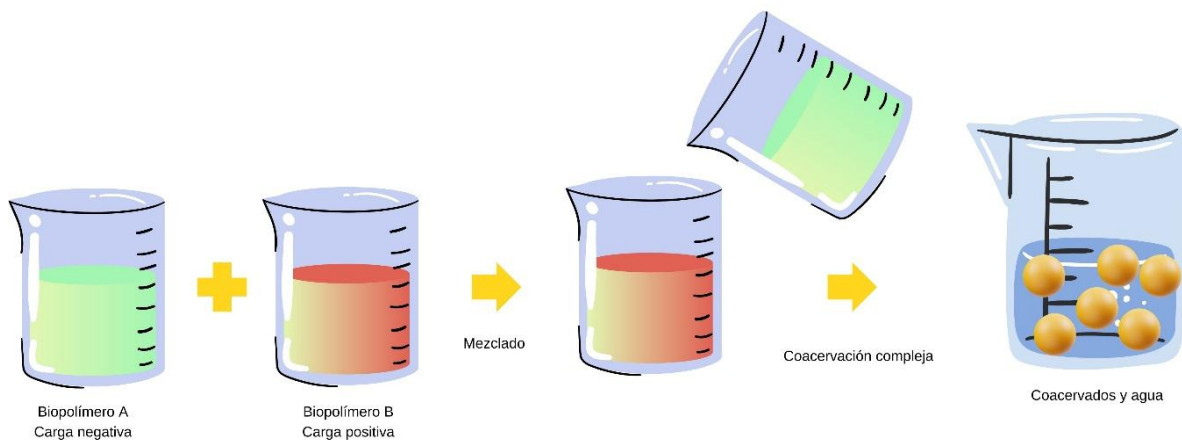


Figura 3. Representación esquemática de la encapsulación por electrospinning y electrospraying

3D Printing–Based Encapsulation

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

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

Co-cristalización

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

Materiales de pared

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

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

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

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

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

Características negativas y desafíos

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

Conclusiones

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

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

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

Referencias

Bazzaz, S., Abbasi, A., Ghotbabad, A. G., Pourjafar, H., & Hosseini, H. (2025). Novel Encapsulation Approaches in the Functional Food Industry: With a Focus on Probiotic Cells and Bioactive Compounds. In *Probiotics and Antimicrobial Proteins* (Vol. 17, Issue 3, pp. 1132–1170). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10364-7>

Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The Role of Microencapsulation in Food Application. *Molecules*, 27(5), 1–16. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>

Candiani, A., Diana, G., Martoccia, M., Travaglia, F., Giovannelli, L., Coïsson, J. D., &

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

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 Diaz¹ 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 entrampados 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 $90^\circ C$ a $100^\circ C$, el límite superior de temperatura que asegura un óptimo crecimiento no debería exceder los $55^\circ C$. 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*, *Caminiella* 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>

Albrahim, 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.



www.smbb.com.mx