

ARTÍCULOS

Biorremediación fúngica: una estrategia para sitios contaminados con petróleo

Fungal bioremediation: a strategy for crude oil-contaminated sites

Diana Laura Peraza-Liñan

ORCID: 0000-0002-0389-3794, dianaperaza29@gmail.com

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)

Benjamín Abraham Ayil-Gutiérrez

ORCID: 0000-0003-3350-4056, bayil@ipn.mx

Centro de Biotecnología Genómica (CBG), Instituto Politécnico Nacional, Reynosa (IPN)

José Alberto López-Santillán

ORCID: 0000-0002-6923-3684, jalopez@docentes.uat.edu.mx

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)

Benigno Estrada-Drouaillet

ORCID: 0000-0002-0332-5658, benestrada@docentes.uat.edu.mx

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)

Ma. Teresa de Jesús Segura-Martínez

ORCID: 0000-0001-8559-3885, tsegura@docentes.uat.edu.mx

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)

Wilberth Alfredo Poot-Poot

ORCID: 0000-0002-2973-3289, wpoot@docentes.uat.edu.mx

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)

Recepción: 09/04/25. Aceptación: 06/10/25. Publicación: 12/08/26

RESUMEN

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, y son estos últimos los que pueden ocasionar mutaciones en el ADN, cáncer e incluso la muerte. De acuerdo con su composición química, el petróleo puede ser de difícil remoción en el ambiente, por lo que es necesario buscar alternativas viables que disminuyan su impacto en el entorno. La biorremediación es una técnica que emplea la capacidad metabólica de plantas y microorganismos para utilizar al petróleo como una fuente de carbono hasta transformarlo en CO_2 , H_2O , CH_4 y ácidos grasos. Los hongos de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* destacan por la producción de enzimas degradadoras de petróleo y biosurfactantes, por lo que son de gran importancia en este trabajo.

PALABRAS CLAVE

biosurfactantes, degradación, enzimas, hidrocarburos, hongos filamentosos, metabolismo

ABSTRACT

Petroleum is a complex mixture of aliphatic and aromatic hydrocarbons, the latter being capable of causing DNA mutations, cancer and even death. Based on its chemical composition, petroleum can be difficult to remove from the environment; therefore, it is necessary to explore viable alternatives to reduce its ecological impact. Bioremediation is a technique that harnesses the metabolic capacity of plants and microorganisms to utilize petroleum as a carbon source, ultimately transforming it into CO_2 , H_2O , CH_4 and fatty acids. Fungi from the genera *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium* are notable for their production of petroleum-degrading enzymes and biosurfactants, making them highly relevant to this study.

KEYWORDS

biosurfactants, degradation, enzymes, hydrocarbons, filamentous fungi, metabolism

Introducción

El petróleo o crudo es una mezcla de compuestos orgánicos conocidos como hidrocarburos y algunos otros elementos, como el oxígeno, azufre y nitrógeno, los cuales son el resultado de la acumulación en el subsuelo de restos fosilizados de animales y plantas. Como resultado de la urbanización y consecuente demanda energética, las actividades de la industria petrolera han aumentado con la finalidad de abastecer las necesidades de la población (Al-Hawash et al., 2018a). Sin embargo, en las actividades de exploración de yacimientos y en la distribución del petróleo ocurren derrames debido a fugas en oleoductos, combustión incompleta, transporte y vandalismo en tomas clandestinas (Ławniczak et al., 2020), lo que representa aproximadamente 110,000 barriles de petróleo vertidos por año en el suelo y el agua (International Tanker Owners Pollution Federation [ITOPF], 2022).

Los derrames de petróleo terminan siendo perjudiciales para el ambiente, debido a que está compuesto por una mezcla de hidrocarburos que, dependiendo de su estructura química y complejidad, persisten en el ambiente y ocasionan daños en la flora y fauna (Farrington, 2014). Estos hidrocarburos se pueden clasificar en cuatro grupos: alcanos, que son compuestos con un enlace sencillo y fácilmente biodegradables (Sayed et al., 2021); aromáticos, con uno o más anillos de benceno y baja solubilidad en el ambiente (Molnárné Guricza y Schrader, 2015), y asfaltenos y resinas, compuestos polares con radicales alquilo (C_nH_{2n+1}) y anillos de benceno que persisten en el sitio afectado (Cho et al., 2012), es decir, los hidrocarburos son compuestos tóxicos que pueden tener efectos perjudiciales en la salud humana y el entorno.

En el ser humano, el consumo de organismos intoxicados con petróleo, como los mariscos, puede ocasionar afectaciones a nivel celular, que dan lugar a malformaciones y al desarrollo de tumores debido a una alteración en el ADN genómico (Zhang et al., 2019). Los compuestos aromáticos son los contaminantes más difíciles de remover y más peligrosos por ser considerados cancerígenos, mutagénicos y recalcitrantes en el ambiente (Czarny et al., 2020). Además, el petróleo permanece en el ambiente por un tiempo prolongado, ya que su degradación es lenta e impide la rápida recuperación del sitio (Barrios San Martín, 2011).

Aunque existen técnicas para la remoción del petróleo de sitios contaminados, como el uso de barreras de contención, dispersantes químicos, incineración y oxidación UV, su eficiencia es baja, ya que requieren una aplicación constante que eleva los costos de operación (Sayed et al., 2021). En la búsqueda de mejores estrategias surgió la biorremediación como alternativa, la cual utiliza la capacidad metabólica de plantas y microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos para la degradación de los hidrocarburos en moléculas menos tóxicas, como el dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y ácidos grasos ($C_nH_{2n+1}COOH$). Además, se ha mencionado que esta técnica puede ser de bajo costo y realizarse en condiciones controladas y con pocos insumos que no generan contaminación secundaria (Czarny et al., 2020).

Entre los microorganismos degradadores, aquellos que se encuentran en los sitios contaminados representan un potencial para la degradación de los compuestos tóxicos en el ambiente, en donde destacan los hongos filamentosos por su morfología hidrofóbica, que les permite adherirse a compuestos hidrófobos, como los hidrocarburos, y tolerar altas concentraciones de contaminantes por la producción de enzimas capaces de catalizar reacciones de degradación (Espinosa-Ortiz et al., 2022).

En el ambiente, los hongos son los principales degradadores de la materia orgánica, capaces de utilizar como fuente de energía (carbono) los compuestos químicos con estructuras similares a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Haritash y Kaushik, 2009). Esta capacidad se debe a la producción de enzimas (catalizadores biológicos) con baja especificidad de sustrato que degradan hidrocarburos, así como la producción de biosurfactantes (tensoactivos), que disminuyen la tensión superficial entre el agua y el petróleo y facilitan la degradación de los hidrocarburos (Arregui et al., 2019; Yuniati, 2018).

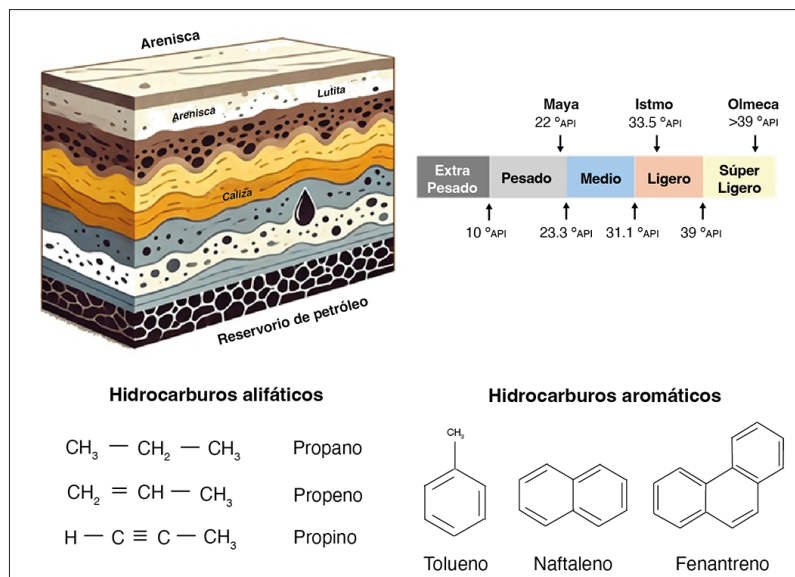
Dicho lo anterior, en este trabajo se describe el uso de hongos filamentosos como mecanismo para la biorremediación y se resalta su capacidad para elaborar enzimas y productos metabólicos que aceleran el proceso.

Hidrocarburos del petróleo

El petróleo tuvo su origen a partir de la descomposición de la materia orgánica del subsuelo, la cual duró varios millones de años. Esta materia provenía del plancton marino acumulado en el fondo de las plataformas costeras o cuencas poco profundas, las cuales se cubrieron de manera sucesiva por capas de sedimentos inorgánicos, como arenas y arcillas. Éstas formaron estratos en los que la elevada presión de las capas de la tierra, las altas temperaturas y la actividad de bacterias anaerobias transformaron lentamente la materia orgánica en una mezcla de compuestos denominados hidrocarburos, que dieron lugar a lo que se conoce como petróleo crudo (Varjani et al., 2014).

Por lo anterior, el petróleo crudo se define como una mezcla compleja de hidrocarburos cuya composición química está constituida en su mayoría por carbono (83-87%) e hidrógeno (11-14%), así como por compuestos orgánicos de oxígeno, nitrógeno, azufre, mercaptanos, dióxido de azufre y, en menor proporción, sales minerales, como cloruros, sulfatos de calcio, magnesio, hierro, níquel, vanadio y plomo (Barois et al., 2018). Los hidrocarburos se clasifican en dos tipos: los alifáticos (alcanos, alquenos y alquinos), los cuales presentan cadenas de carbono lineales o ramificadas que pueden ser abiertas o cíclicas, y los aromáticos; entre éstos se encuentran aquellos que presentan al menos una estructura de carbono monocíclica, denominados hidrocarburos aromáticos monocíclicos (HAM), como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEx), y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), que contienen más de un anillo bencénico, como el naftaleno (dos anillos), fenantreno y antraceno (tres anillos) (Varjani, 2017).

Figura 1
Composición del petróleo crudo y clasificación de los hidrocarburos



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, los hidrocarburos volátiles son compuestos de cadena corta (C_6 - C_{10}), y dentro de este grupo se encuentran el metano, etano, propano, acetileno y butano, mientras que los compuestos de cadena larga (C_{10} - C_{40}) son de baja volatilidad, como los HAP. Dependiendo del tipo y de la abundancia de los hidrocarburos, las propiedades físicas y químicas del petróleo pueden cambiar, es decir, su densidad o viscosidad, el color (verde, amarillo, marrón o negro) y los productos derivados que se pueden obtener de él (Varjani et al., 2014).

La composición del petróleo crudo varía dependiendo de la ubicación, la geología del yacimiento y el pozo; asimismo, se clasifica en función de su peso molecular en superligero, ligero y pesado. De acuerdo con el Instituto Americano de Petróleo (API, por sus siglas en inglés), el petróleo se puede clasificar considerando su densidad en grados API ($^{\circ}\text{API}$) para determinar qué tan ligero o pesado es con respecto a un mismo volumen de agua bajo condiciones específicas (Barois et al., 2018). En donde el petróleo es menor a 10°API se considera extrapesado y valores superiores a 39°API se considera superligero. En México, Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha clasificado al petróleo en tres tipos, considerando su densidad API: Olmeca (superligero), Istmo (ligero) y Maya (pesado), que en conjunto forman la Mezcla Mexicana (PEMEX, 2023) (figura 1).

Efectos del petróleo en los seres vivos

El uso del petróleo como combustible en las actividades diarias del ser humano ha sido constante, y con el crecimiento de la población también ha aumentado la actividad de la industria

petrolera, lo que ha ocasionado el incremento de derrames de petróleo en el suelo y los cuerpos de agua (Li et al., 2016). Según ITOPI (2022), la incidencia total de vertidos ha sido de más de 52.3 millones de barriles de petróleo en 140 incidentes.

De manera cotidiana, estos compuestos están presentes en productos que utilizamos; sin embargo, aquellos que se encuentran por vertidos de petróleo producen afectaciones graves en el sistema nervioso central y provocan la muerte si la exposición es alta y prolongada; algunos son volátiles a temperatura ambiente y otros se disuelven en el agua, pero aquellos con un alto peso molecular permanecen en el ambiente y son de difícil remoción (Todd et al., 1999).

En la fauna, el petróleo ingerido por el organismo ocasiona toxicidad directa, fallos en los sistemas reproductivos e incluso la muerte por asfixia (Zhang et al., 2019). En las aves marinas, el contacto con el petróleo dificulta el vuelo y no pueden sobrevivir, por lo que terminan muriendo (Farrington, 2014). Además, los organismos intoxicados por petróleo no son aptos para el mercado, lo cual ocasiona pérdidas económicas y restringe las actividades de pesquería (Sayed et al., 2021).

En los humanos, el contacto con el petróleo puede ser por la dermis, inhalación o ingestiva, y dependiendo del tiempo y la exposición ocasiona problemas de cáncer que pueden presentarse con efectos temporales o permanentes (Souza et al., 2014). Los derivados del petróleo, como el gasóleo, el queroseno y el diésel, al ser ingeridos dañan el sistema nervioso central, el sistema inmune e incluso afectan los órganos (riñones e hígado), así como el desarrollo de fetos (Souza et al., 2014; Todd et al., 1999).

Además, se ha reportado que los operadores encargados de atender los vertidos de petróleo se ven afectados al tener contacto directo con los compuestos durante el proceso de limpieza, por lo que presentan malestares que persisten por un periodo de doce meses, como dolores de cabeza, pérdida de visión, parálisis corporal, afectaciones en vías respiratorias, sarpullido en la piel y dolor de espalda (Na et al., 2012).

Biorremediación de sitios contaminados con petróleo

La biorremediación es un proceso que utiliza tratamientos para la restauración o limpieza del suelo, agua y aire contaminado por agentes tóxicos, mediante sistemas biológicos o una combinación de éstos con técnicas físicas y químicas. En general, este proceso emplea la capacidad metabólica de los microorganismos, como bacterias, hongos, levaduras y algas, así como algunas plantas, para acelerar el proceso de degradación natural hasta la obtención de moléculas de CO_2 , H_2O y ácidos grasos. En la biorremediación las técnicas pueden llevarse a cabo de manera *in situ* o *ex situ*. En la primera, el sitio contaminado es tratado directamente en el lugar, y de manera *ex situ*, los contaminantes son trasladados para su posterior análisis y tratamiento (Sayed et al., 2021).

Comparado con las técnicas físicas y químicas, la biorremediación no genera contaminación secundaria al utilizar organismos, ya que, al no emplear químicos, evita la alteración de las propiedades del sitio afectado y, como no utiliza barreras de contención, disminuye los costos de operación. Cabe mencionar que el uso de las técnicas físicas y químicas suele trasladar el contaminante pero no lo degradan. Por ello, la biorremediación es una alternativa para la degradación de compuestos orgánicos, como los hidrocarburos del petróleo presentes en los derrames (Barrios San Martín, 2011).

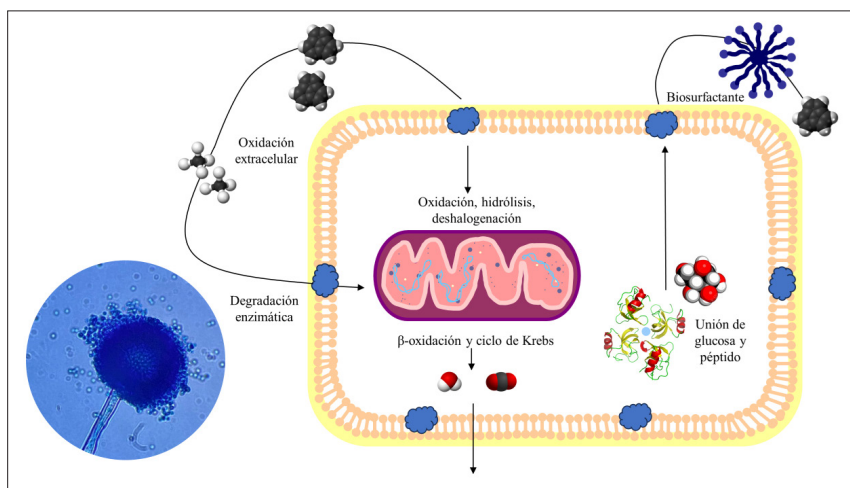
Metabolismo microbiano en la biorremediación de sitios con petróleo

Los microorganismos requieren fuentes de carbono para crecer y multiplicarse; en su metabolismo, las enzimas catalizan reacciones químicas para asimilar compuestos en formas más simples: primero metabolizan compuestos de fácil asimilación y después aquellos con estructuras más complejas (Sayed et al., 2021). En la degradación de petróleo ocurre un proceso similar: el microorganismo metaboliza compuestos orgánicos de cadena corta, que por lo general son hidrocarburos alifáticos, propensos a la oxidación (Varjani, 2017); al terminar, metabolizan compuestos más sencillos, como los hidrocarburos monocíclicos, y, una vez que los asimilan, utilizan como fuente de energía los policíclicos. De esta manera logran degradar diferentes hidrocarburos a través de su sistema enzimático para la obtención de energía (El Madhi et al., 2016). Cabe mencionar que los microorganismos sólo podrán metabolizar aquellos compuestos que puedan biodegradar (Sayed et al., 2021).

Uno de los procesos metabólicos que los microorganismos llevan a cabo es el de la cadena respiratoria, en la cual ocurre una serie de reacciones de óxido-reducción, donde los microorganismos utilizan como aceptor de electrones al oxígeno en condiciones aerobias y, en condiciones anaerobias, al nitrato, sulfato y dióxido de carbono, de los cuales este último no es tan común (Barrios San Martín, 2011). En el proceso aerobio, la oxidación se genera a través de oxigenasas o intermediarios que se incorporan al ciclo de Krebs, como el catecol y el gentisato, así como ácidos grasos; este proceso se desarrolla en dos etapas: primero se activa el sustrato mediante una carboxilación o hidroxilación para formar tioésteres; después, los intermediarios (reductasas) catalizan la reacción y rompen el anillo de los compuestos en metabolitos que puede utilizar el microorganismo (Barrios San Martín, 2011). Este proceso requiere de oxígeno molecular para convertir el hidrocarburo en CO_2 y H_2O (Al-Dhabaan, 2021).

En los hongos, el metabolismo depende de sustancias y metabolitos excretados extracelularmente, donde intervienen moléculas de naturaleza proteica (enzimas) que catalizan reacciones químicas dentro de las células (Li et al., 2020). Al metabolizar los hidrocarburos, los hongos oxidan los compuestos aromáticos, aminos y fenoles en compuestos simples o asimilados en la biomasa, utilizando enzimas como oxidasas, peroxidasas, hidrolasas y monooxigenasas (Gadd, 2004).

Figura 2
Diagrama de interacción de la membrana celular fúngica
con hidrocarburos del petróleo



Fuente: diagrama adaptado de Li et al. (2020).

Los hongos pueden degradar los hidrocarburos mediante dos formas: una, utilizando enzimas extracelulares (lignina, lacasa y manganeso peroxidasa) y, derivado de este proceso, produciendo metabolitos, como ácidos orgánicos, aminoácidos y proteínas (Liang y Gadd, 2017), y de manera intracelular, degradando los contaminantes orgánicos, los cuales, al ser permeables, entran por las membranas celulares del hongo y son catalizados por enzimas del citocromo P450, deshalogenasas reductoras y nitrorreductasas (Stella et al., 2017). Los hongos, después de obtener moléculas simples, las utilizan en los procesos metabólicos de β -oxidación y en el ciclo de Krebs (Varjani, 2017).

En los procesos metabólicos, la transformación del petróleo puede ser parcial al obtener compuestos menos tóxicos que los iniciales, mientras que de manera total se denomina *mineralización*, donde se obtienen moléculas de CO_2 y H_2O que, por lo general, resultan de un proceso aerobio, mientras que en condiciones anaerobias se obtienen moléculas de CH_4 y H_2O (Barrios San Martín, 2011) (figura 2).

El papel de los hongos en la biorremediación

Los hongos son organismos eucariontes, heterótrofos, que se alimentan de compuestos orgánicos, y son cosmopolitas, es decir, pueden distribuirse en todo el mundo y multiplicarse de forma independiente (Gadd, 2004). Son considerados como los principales degradadores de materia orgánica, ya que facilitan la disponibilidad de nutrientes para otros organismos (Durairaj et al., 2015).

Dentro de los compuestos que los hongos degradan se encuentra la lignina, un polímero que forma parte de la pared celular del tejido vegetal, el cual tiene una estructura aromática, como los HAP, por lo que estos organismos tienen la capacidad de degradar aquellos compuestos con estructuras similares y complejas (Haritash y Kaushik, 2009). Además, pueden crecer en presencia de compuestos tóxicos, como los hidrocarburos, los cuales están conformados por elementos de C, N, O y S, de manera que los pueden utilizar como energía (Espinosa-Ortiz et al., 2022).

Por otro lado, los hongos toleran ambientes extremos con baja disponibilidad de nutrientes y pueden crecer en ambientes que van desde ácidos hasta neutros (pH de 3 a 7) (Pinedo-Rivilla et al., 2009); además, producen proteínas hidrofóbicas, como las hidrofobinas, que les permiten adherirse a los compuestos del petróleo por su hidrofobicidad, lo que facilita la degradación en cuerpos de agua (Gadd, 2004). Asimismo, producen enzimas de manera extracelular con baja especificidad de sustrato, dentro de las cuales destacan la lacasa, la lignina y el manganoso peroxidasa, que metabolizan contaminantes orgánicos (Li et al., 2020).

El potencial de biorremediación de los hongos depende de la población microbiana presente, el tipo de hidrocarburo, así como la biodisponibilidad que tiene el organismo para el compuesto y la velocidad a la que ocurre la degradación (Sayed et al., 2021). Por sí solos, como un cultivo puro, pueden degradar los compuestos del petróleo, pero una convivencia de diferentes especies (co-cultivo) puede aumentar el potencial de biodegradación de estos organismos (Molnár Gúricza y Schrader, 2015). Un co-cultivo puede sintetizar diferentes enzimas debido a que, al estar presentes distintas especies, se producen enzimas afines a diversos sustratos, lo cual permite una degradación completa de los compuestos y facilita el crecimiento de los microorganismos cuando se suministran productos metabólicos en un co-metabolismo (Liang y Gadd, 2017).

Se ha reportado que los hongos filamentosos tienen la capacidad de degradar hidrocarburos del petróleo. Entre estos destacan los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Mucor* y *Pleurotus*, lo que los convierte en una alternativa para la remoción de estos compuestos contaminantes para el ambiente (Al-Hawash et al., 2018a; Al-Hawash et al., 2018b; Al-Dhabaan, 2021).

Factores que afectan la biorremediación fúngica

En la biorremediación es importante determinar la viabilidad del microorganismo para utilizar el compuesto, las condiciones de crecimiento, la disponibilidad de los nutrientes, el oxígeno, la temperatura y el pH durante la biodegradación (Varjani, 2017), ya que una concentración alta del hidrocarburo inhibe la actividad microbiana y la velocidad de degradación (Barrios San Martín, 2011). Asimismo, es necesario determinar si el microorganismo tiene biodisponibilidad para los compuestos de interés y si las especies provienen de sitios afectados

(autóctonas) o si son originarias de un sitio diferente (exógenas) pero tienen potencial en la biorremediación (Sayed et al., 2021).

Otro factor por considerar en la biorremediación mediada por microorganismos es la presencia de elementos como el nitrógeno y el fósforo, que permiten la síntesis de los aminoácidos y las enzimas que intervienen en los procesos metabólicos utilizados por el microorganismo en la degradación del petróleo (Barrios San Martín, 2011). Por lo general, los microorganismos trabajan con pH cercanos a la neutralidad, ya que en condiciones ácidas se dificulta la solubilización y la absorción de los contaminantes, lo que afecta la actividad microbiana (Li et al., 2020).

En el ambiente, la presencia de minerales en cantidades altas aumenta el intercambio catiónico y disminuye la disponibilidad de los compuestos orgánicos, lo cual dificulta su degradación (Carrillo-Chávez et al., 2014). Es importante conocer las condiciones en las que crece un microorganismo, ya que algún desajuste genera desequilibrio en las cargas netas de los iones, lo cual inhibe las enzimas y, por lo tanto, no permite la degradación de los compuestos (Ceci et al., 2019).

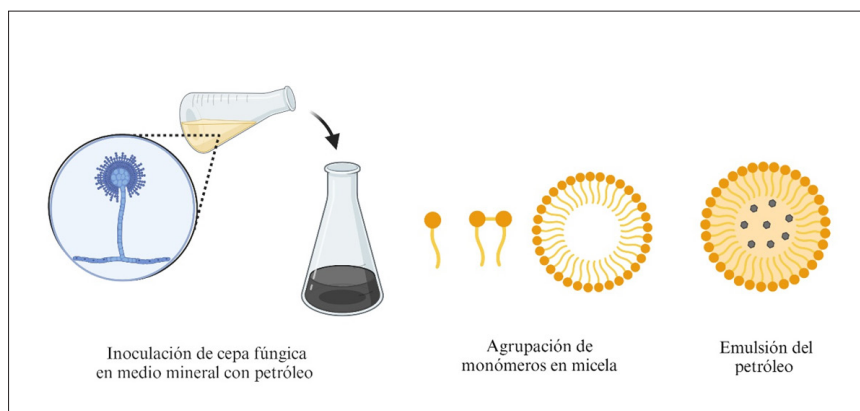
La temperatura también es un factor determinante en la actividad metabólica de los microorganismos, ya que cada especie trabaja en un rango óptimo, en donde, a temperaturas bajas, la actividad microbiana se detiene y los hidrocarburos aumentan su viscosidad; ocurre lo mismo a temperaturas por arriba de 40 °C, donde la actividad se detiene y las enzimas se desnaturalizan (Li et al., 2020; Rangel et al., 2018). Por lo general, la temperatura óptima para los microorganismos es entre 28 °C y 30 °C; en estas condiciones pueden realizar su metabolismo y biodegradar los compuestos (Ceci et al., 2019).

Importancia de los biosurfactantes en la degradación del petróleo

Los biosurfactantes son moléculas tensoactivas que permiten la interacción de dos sustancias inmiscibles mediante la disminución de la tensión superficial e interfacial, por ejemplo, el agua y el aceite (Alves Sanches et al., 2021; Becerra Gutiérrez y Horna Acevedo, 2016). La estructura química de estas moléculas es anfipática, es decir, uno de sus extremos es polar o hidrófilo (tiene afinidad con el agua) y el otro es no polar o hidrófobo (repele el agua y se une a compuestos lipídicos) (Nitschke y Pastore, 2002). Estas moléculas anfipáticas son producidas por plantas, animales y varios microorganismos, como las bacterias, hongos y levaduras (Becerra Gutiérrez y Horna Acevedo, 2016).

El biosurfactante, por sus propiedades anfipáticas, se caracteriza por presentar una concentración micelar crítica (CMC) y un equilibrio hidrófilo-lipofílico (EHL); ambas propiedades cumplen un papel muy importante en el agregado de estructuras micelares, que en entornos hidrófobos aumentan la solubilidad de los hidrocarburos y la biodisponibilidad entre las células del microorganismo y el petróleo. A través de estas propiedades, los biosurfactantes

Figura 3
Diagrama de producción de biosurfactantes por cepa fúngica
en medio mineral con petróleo



Fuente: elaboración propia utilizando BioRender.

reducen la tensión interfacial entre dos fases y permiten que ocurra la biodegradación de los compuestos (Bustamante et al., 2012).

La concentración del biosurfactante tiene un papel importante en la tensión interfacial, ya que, al aumentar la concentración del tensoactivo, disminuye la tensión entre el agua y el aceite, formando moléculas con una cabeza polar al exterior y una cola no polar al interior. Al aumentar la CMC, estos monómeros o moléculas individuales se juntan y forman agregados denominados micelas que pueden disolver a los compuestos hidrófobos como los hidrocarburos, debido a que presentan un núcleo que aumenta la solubilidad de los contaminantes. Por otro lado, el EHL describe la relación entre las partes hidrófilas e hidrófobas de la molécula del tensoactivo, indicando los tipos de aceites que puede emulsionar. Aquellos tensoactivos que mantienen un EHL bajo son lipofílicos, mientras que un alto EHL indica una mejor solubilidad en agua (Bustamante et al., 2012).

Algunos de los factores que influyen en el proceso de producción de los biosurfactantes son las condiciones del cultivo, así como el tipo de microorganismo y la fuente de carbono, en donde las necesidades de nutrición pueden favorecer la producción específica de un tipo de biosurfactante (Seghal Kiran et al., 2009). En los hongos, la composición de esta molécula también depende de las condiciones en que se aisló el hongo. Una cepa aislada de un sitio contaminado con petróleo puede utilizar compuestos derivados o una mezcla de éstos para inducir la producción de biosurfactantes y reducir la tensión superficial e interfacial (Alves Sanches et al., 2021).

Cabe mencionar que dentro de los biosurfactantes se encuentran los de tipo glicolípidos, conformados por carbohidratos (glucosa y galactosa) y ácidos grasos con grupos hidroxilo (OH)

Tabla 1
Especies de hongos filamentosos productores de biosurfactantes
en la degradación de hidrocarburos

Especie	Biosurfactante	Fuente	Degradación %	Referencia
<i>Aspergillus</i> sp. RFC-1	Lípido	n-hexadecano	86.3	Al-Hawash et al. (2018b)
<i>Penicillium</i> sp. RMA1	TS*	Petróleo crudo	57.0	Al-Hawash et al. (2018a)
<i>Penicillium citrinum</i>	Glicolípido	Hidrocarburos totales	40.0	Camargo-de-Morais et al. (2003)
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Lipopéptido	Diésel	43.0	Gautam et al. (2014)
<i>Aspergillus niger</i>	Glicolípido	Petróleo crudo	---	Kannahi y Sherley (2012)
<i>Scedosporium</i> sp. ZYY	---	Hidrocarburos totales	58.6	Atakpa et al. (2022)
<i>Aspergillus niger</i>	TS*	Petróleo crudo	58.0	Al-Dhabaan (2021)
<i>Aspergillus polyporicola</i>	TS*	Petróleo crudo	47.0	Al-Dhabaan (2021)
<i>Aspergillus spelaesus</i>	TS*	Petróleo crudo	51.0	Al-Dhabaan (2021)
<i>Irpex lacteus</i>	TS*	Antraceno	60.0	Drevinskas et al. (2015)
<i>Pleurotus ostreatus</i>	TS*	Antraceno	56.0	Drevinskas et al. (2015)
<i>Ganoderma lucidum</i>	TS*	Pireno	99.0	Agrawal et al. (2018)

TS*: Reduce tensión superficial, pero no se ha caracterizado el tipo de biosurfactante; ---: no se ha reportado.

y radicales alquilo (Nitschke y Pastore, 2002); también producen lipopéptidos, que consisten en ácidos grasos con grupos carboxilo (-COOH) y OH unidos a aminoácidos (Shah et al., 2016). Por ser de origen biológico, presentan menor toxicidad al ambiente y se consideran biodegradables, además de que pueden tolerar temperaturas extremas, salinidad, pH ácido y alcalino (Alves Sanches et al., 2021). Estas características les dan el potencial para utilizarse en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas con petróleo (Santos et al., 2016).

Conclusión

La biorremediación es una técnica que se usa en la restauración de ambientes contaminados con petróleo; sin embargo, se ha puesto poco énfasis en el metabolismo de los hongos y sus respuestas a los diferentes tipos de hidrocarburos. Los hongos filamentosos destacan por su capacidad para producir metabolitos extracelulares, como biosurfactantes y enzimas; dentro de este grupo se encuentran los hongos de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, con capacidad metabólica degradativa, por lo que se pueden considerar en los procesos de remediación de sitios contaminados. Sin embargo, es importante comprender las rutas metabólicas implicadas en la recuperación de estos sitios, así como la regulación de la expresión de los genes responsables de la síntesis de estos metabolitos, con el fin de entender de manera integral los procesos de remediación.

Referencias

- Agrawal, N., Verma, P. y Kumar Shahi, S. (2018). Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (phenanthrene and pyrene) by the ligninolytic fungi *Ganoderma lucidum* isolated from the hardwood stump. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 5-11. <http://dx.doi.org/10.1186/s40643-018-0197-5>
- Al-Dhabaan, F. A. (2021). Mycoremediation of crude oil contaminated soil by specific fungi isolated from Dhahran in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 73-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.033>
- Al-Hawash, A. B., Alkoorenee, J. T., Abbood, H. A., Zhang, J., Sun, J., Zhang, X. y Ma, F. (2018a). Isolation and characterization of two crude oil-degrading fungi strains from Rumalia oil field, Iraq. *Biotechnology Reports*, 17, 104-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2017.12.006>
- Al-Hawash, A. B., Zhang, J., Li, S., Liu, J., Ghalib, H. B. y Ma, F. (2018b). Biodegradation of n-hexadecane by *Aspergillus* sp. RFC-1 and its mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 398-408. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.049>
- Alves Sanches, M., Galvão Luzeiro, I., Alves Cortez, A.C., Simplício de Souza, É., Melchionna Albuquerque, P., Kumar Chopra, H. y Braga de Souza, J. V. (2021). Production of biosurfactants by ascomycetes. *Hindawi International Journal of Microbiology*, 2021(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2021/6669263>
- Arregui, L., Ayala, M., Gómez-Gil, X., Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Luna, C. E., Herrera de los Santos, M., Levin, L., Roja-Domínguez, A., Romero-Martínez, D., Saparrat, M. C. N., Trujillo-Roldán, M. A. y Valdez-Cruz, N. A. (2019). Laccases: structure, function, and potential application in water bioremediation. *Microbial Cell Factories*, 18(200), 1-33. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1248-0>
- Atakpa, O. E., Zhou, H., Jiang, L., Ma, Y., Liang, Y., Li, Y., Zhang, D. y Zhang, C. (2022). Improved degradation of petroleum hydrocarbons by co-culture of fungi and biosurfactant-producing bacteria. *Chemosphere*, 290, 133337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133337>
- Barois, I., Contreras Ramos, S. M., Hernández Castellanos, B., Santos, M., Martínez, F. y García, D. R. (2018). *El suelo y el petróleo: estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México*. Instituto de Ecología AC.
- BarriosSanMartín, Y. (2011). Biorremediación: una herramienta para el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados con petróleo. *Bioteecnología Aplicada*, 28(2), 60-68. <https://elfoscientiaecigb.edu.cu/PDFs/Biotechnol%20Apl/2011/28/2/BA002802RVo60-068.pdf>
- Becerra Gutiérrez, L. K. y Horna Acevedo, M. V. (2016). Aislamiento de microorganismos productores de biosurfactantes y lipasas a partir de efluentes residuales de camales y suelos contaminados con hidrocarburos. *Scientia Agropecuaria*, 7(1), 23-31. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>

- Bustamante, M., Durán, N. y Diez, M. C. (2012). Biosurfactants are useful tools for the bioremediation of contaminated soil: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4), 667-687. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000024>
- Camargo-de-Morais, M. M., Ramos, S. A. F., Pimentel, M. C. B., Morais Jr., M. A. y Lima Filho, J. L. (2003). Production of an extracellular polysaccharide with emulsifier properties by *Penicillium citrinum*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 19, 191-194. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023299116663>
- Carrillo-Chávez, A., Salas-Megchún, E., Levresse, G. y Muñoz-Torres, C. (2014). Geochemistry and mineralogy of mine-waste material from a “skarn-type” deposit in Central Mexico: modeling geochemical controls of metals in the surface environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, parte A, 28-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.017>
- Ceci, A., Pinzari, F., Russo, F., Persiani, A. M. y Gadd, G. M. (2019). Roles of saprotrophic fungi in biodegradation or transformation of organic and inorganic pollutants in co-contaminated sites. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 53-68. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fso0253-018-9451-1>
- Cho, Y., Na, J.-G., Nho, N.-S., Kim, S. H. y Kim, S. (2012). Application of saturates, aromatics, resins, and asphaltenes crude oil fractionation for detailed chemical characterization of heavy crude oils by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry equipped with atmospheric pressure photoionization. *Energy & Fuels*, 26(5), 2558-2565. <http://dx.doi.org/10.1021/ef201312m>
- Czarny, J., Staninska-Pięta, J., Piotrowska-Cyplik, A., Juzwa, W., Wolniewicz, A., Marecik, R., Ławniczak, Ł. y Chrzanowski, Ł. (2020). *Acinetobacter* sp. as the key player in diesel oil degrading community exposed to PAHs and heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 383(3), 121168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121168>
- Drevinskas, T., Mickienė, R., Maruška, A., Stankevičius, M., Tiso, N., Mikašauskaitė, J., Ragažinskienė, O., Levišauskas, D., Bartkuvienė, V., Snieškienė, V., Stankevičienė, A., Polcaro, C., Galli, E., Donati, E., Tekorius, T., Kornýšova, O. y Kaškonienė, V. (2015). Downscaling the *in vitro* test of fungal bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: methodological approach. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(4), 1043-1053. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-015-9191-3>
- Durairaj, P., Malla, S., Prabhu Nadarajan, S., Lee, P.-G., Jung, E., Park, H. H., Kim, B.-G. y Yun, H. (2015). Fungal cytochrome P450 monooxygenases of *Fusarium oxysporum* for the synthesis of ω -hydroxy fatty acids in engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbial Cell Factories*, 14(1), 45. <http://dx.doi.org/10.1186/s12934-015-0228-2>

- El Madhi, A. M., Abdul Aziz, H., Abu Amr, S. S., El-Gendy, N. S. y Nassar, H. N. (2016). Isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. NAF1 and its application in biodegradation of crude oil. *Environmental Earth Sciences*, 75, 380. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5296-z>
- Espinosa-Ortiz, E. J., René, E. R. y Gerlach, R. (2022). Potential use of fungi-bacterial co-cultures for the removal of organic pollutants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 42(3), 361-383. <http://dx.doi.org/10.1080/07388551.2021.1940831>
- Farrington, J. W. (2014). Oil pollution in the marine environment II: fates and effects of oil spills. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 56(4), 16-31. <https://doi.org/10.1080/00139157.2014.922382>
- Gadd, G. M. (2004). Mycotransformation of organic and inorganic substrates. *Mycologist*, 18(2), 60-70. [https://doi.org/10.1017/S0269-915X\(04\)00202-2](https://doi.org/10.1017/S0269-915X(04)00202-2)
- Gautam, G., Mishra, V., Verma, P., Kumar Pandey, P. y Negi, S. (2014). A cost effective strategy for production of bio-surfactant from locally isolated *Penicillium chrysogenum* SNPs and its applications. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 1-7. <http://dx.doi.org/10.4172/2155-9821.1000177>
- Haritash, A. K. y Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>
- International Tanker Owners Pollution Federation (2022). Data and statistics. ITOPF, sp. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/>
- Kannahi, M. y Sherley, M. (2012). Biosurfactant production by *Pseudomonas putida* and *Aspergillus niger* from oil contaminated site. *International Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 37-42. <https://www.ijcps.com/files/vol3issue4/6.pdf>
- Ławniczak, Ł., Wóznia-Karczewska, M., Loibner, A. P., Heipieper, H. J. y Chrzanowski, Ł. (2020). Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review. *Molecules*, 25(4), 856. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25040856>
- Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B. y Zhang, B. (2016). Offshore oil spill response practices and emerging challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.020>
- Li, Q., Liu J. y Gadd, G. M. (2020). Fungal bioremediation of soil co-contaminated with petroleum hydrocarbons and toxic metals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(21), 8999-9008. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-020-10854-y>
- Liang, X. y Gadd, G. M. (2017). Metal and metalloid biorecovery using fungi. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1119-1205. <http://dx.doi.org/10.1111/1751-7915.12767>

- Molnárné Guricza, L. y Schrader, W. (2015). New separation approach for asphaltene investigation: argentation chromatography coupled with ultrahigh-resolution mass spectrometry. *Energy & Fuels*, 29(10), 6224-6230. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01285>
- Na, J. U., Sim, M. S., Jo, I. J. y Song, H. G. (2012). The duration of acute health problems in people involved with the cleanup operation of the Hebei Spirit oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, 64(6), 1246-1251. <http://dx.doi.org/10.1097/01.ede.0000362837.37333.cf>
- Nitschke, M. y Pastore, G. M. (2002). Biosurfactantes: propriedades e aplicações. *Quimica Nova*, 25(5), 772-776. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422002000500013>
- Petróleos Mexicanos (2023). Anuario estadístico. PEMEX, sp. <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/AnuarioEstadistico.aspx>
- Pinedo-Rivilla, C., Aleu, J. y Collado, I. (2009). Pollutants biodegradation by fungi. *Current Organic Chemistry*, 13(12), 1194-1214. <http://dx.doi.org/10.2174/138527209788921774>
- Rangel, D. E. N., Finlay, R. D., Hallsworth, J. E., Dadachova, E. y Gadd, G. M. (2018). Fungal strategies for dealing with environment -and agriculture- induced stresses. *Fungal Biology*, 12(6), 602-612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funbio.2018.02.002>
- Santos, F. D. K., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A. y Sarubbo, L. A. (2016). Biosurfactants: multifunctional biomolecules of the 21st century. *Molecular Sciences*, 17(3), 1-31. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms17030401>
- Sayed, K., Baloo, L. y Kumar Sharma, N. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environment Research and Public Health*, 18(5), 2226. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18052226>
- Seghal Kiran, G., Hema, T. A., Gandhimathi, R., Selvin, J. Thomas, T. A., Rajeetha Ravji, T. y Natarajaseenivasan, K. (2009). Optimization and production of a biosurfactant from the sponge-associated marine fungus *Aspergillus ustus* MSF3. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 73(2), 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.05.025>
- Shah, N., Gaikwad, S., Sapre, V. y Kaur, J. (2016). Biosurfactant: types, detection methods, importance and applications. *Indian Journal Microbiology*, 3(1), 5-10. <http://dx.doi.org/10.5958/2394-5478.2016.00002.9>
- Souza, E. C., Vessoni-Penna, T. C. y Pinheiro de Souza Oliveira, R. (2014). Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: an overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 89, 88-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.007>
- Stella, T., Covino, S., Čvančarová, M., Filipová, A., Petruccioli, M., D'Annibale, A. y Cajthaml, T. (2017). Bioremediation of long-term PCB-contaminated soil by white-rot fungi. *Journal of Hazardous Materials*, 324, parte B, 701-710. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.044>

- Todd, G. D., Chessin, R. L. y Colman, J. (eds.) (1999). *Toxicological profile for petroleum hydrocarbons (TPH)*. Department of Health and Human Services. https://books.google.com.mx/books?id=QKh6S-xpmhoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Varjani, S. J., Rana, D. P., Bateja, S., Sharma, M. C. y Upasani, V. N. (2014). Screening and identification of biosurfactant (bioemulsifier) producing bacteria from crude oil contaminated sites of Gujarat, India. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(2), 9205-9213. https://www.ijirset.com/upload/2014/february/31_Screening.pdf
- Yuniati, M. D. (2018). Bioremediation of petroleum-contaminated soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 012063. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012063>
- Zhang, B., Matchinski, E. J., Chen, B., Ye, X. D., Jing, L. y Lee, K. (2019). Marine oil spills-oil pollution sources and effects. En C. Sheppard (ed.), *World seas. An environmental evaluation. Volume III: Ecological issues and environmental impacts* (pp. 391-406). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3>