

Importancia de las bacterias nativas de ambientes acuáticos afectados por derrames de petróleo

Importance of native bacteria in aquatic environments affected by oil spills

Rocío del Carmen Castillo-Márquez*✉, Jacinto Treviño-Carreón*,
José Alberto López-Santillán*, Eduardo Osorio-Hernández*, Wilberth
Alfredo Poot-Poot*, Benigno Estrada-Drouaillet*

Castillo-Márquez, R. C., Treviño-Carreón, J., López-Santillán, J. A., Osorio-Hernández, E., Poot-Poot, W. A., & Estrada-Drouaillet, B. (2023). Importancia de las bacterias nativas de ambientes acuáticos afectados por derrames de petróleo. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 31 (88), e3999, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2023883999>

RESUMEN

Este artículo destaca la importancia en la biorremediación de las bacterias nativas de sitios afectados por derrames de petróleo. Los hidrocarburos liberados en los derrames de petróleo son fuente de contaminación para los ecosistemas acuáticos y terrestres debido a su persistencia en el ambiente; además son considerados altamente tóxicos, causando graves daños a la salud humana, así como a la flora y fauna de los sitios afectados. Con la finalidad de mitigar los efectos negativos que causa la contaminación por los derrames hidrocarburos se han desarrollado técnicas amigables con el medio ambiente como la biorremediación; que emplea organismos como plantas, hongos y bacterias nativas, como *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus* y *Rhodococcus* capaces de degradar petróleo, diésel y gasolina, ya que producen moléculas que facilitan la degradación de los contaminantes llamadas biosurfactantes, estos cambian las condiciones de la superficie entre el agua y los hidrocarburos, lo que les permite degradar el contaminante.

Palabras clave: agua; biosurfactantes; contaminación; degradación; hidrocarburos; microorganismos.

Recibido: 7 de julio de 2022 Aceptado: 16 de diciembre de 2022 Publicado: 31 de enero de 2023

*División de Estudios de Posgrado e Investigación, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Victoria, C. P. 87120, Tamaulipas, México.

Correo electrónico: a2163010072@alumnos.uat.edu.mx; jatrevino@docentes.uat.edu.mx;
jalopez@docentes.uat.edu.mx; eosorio@docentes.uat.edu.mx; wpoot@docentes.uat.edu.mx;
benestrada@docentes.uat.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6952-9768>; <https://orcid.org/0000-0001-7945-4010>; <https://orcid.org/0000-0002-6923-3684>; <https://orcid.org/0000-0002-9248-8167>; <https://orcid.org/0000-0002-2973-3289>; <https://orcid.org/0000-0002-0332-5658>

✉ Autora para correspondencia

ABSTRACT

This article highlights the importance of native bacteria in the bioremediation of sites affected by oil spills. Hydrocarbons released in oil spills are a source of contamination for aquatic and terrestrial ecosystems due to their persistence in the environment and are considered highly toxic, causing serious damage to human health, as well as to the flora and fauna of the affected sites. In order to mitigate the negative effects caused by oil spills, environmentally friendly techniques have been developed, such as bioremediation; which uses organisms such as plants, fungi and native bacteria, such as *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus* and *Rhodococcus* capable of degrading oil, diesel and gasoline, as they produce molecules that facilitate the degradation of pollutants called biosurfactants, which change the surface conditions between water and hydrocarbons, allowing them to degrade the pollutant.

Keywords: water; biosurfactants; contamination; degradation; hydrocarbons; microorganisms.

INTRODUCCIÓN

Los derrames de petróleo se derivan de las actividades de la industria petrolera como son la perforación de pozos, el transporte del hidrocarburo y el traslado desde alta mar a tierra firme, estos forman parte de los principales problemas que causan la contaminación de los ecosistemas (Mirjani, Soleimani, & Salari, 2021). Los hidrocarburos de petróleo son compuestos orgánicos persistentes en el ambiente en donde son vertidos; las propiedades físicas que poseen tales como la densidad relativa, la volatilidad, la fluidez y la viscosidad dificultan su remoción, por lo que se han explorado diferentes técnicas que permitan su eliminación para remediar los sitios afectados (De la Huz, Lastra, & López, 2011). Los hidrocarburos también son considerados altamente tóxicos para el hombre, ya que producen irritación en los ojos y piel, así como enfermedades respiratorias, dolor de cabeza, alteraciones en el ADN inclusive provocan diferentes tipos de cáncer (Marris, Kompella, & Miller, 2020; Pérez, López, Rodríguez, & Ramos, 2019). En los ecosistemas acuáticos causan daños funcionales al impedir que se lleven a cabo procesos químicos como la fotosíntesis, ya que cuando se sitúan en el espejo de agua forman una capa superficial que obstruye el paso de la luz solar, alterando la cantidad de oxígeno disuelto; se ha registrado que el hidrocarburo se adhiere al plumaje de las aves acuáticas, lo que dificulta su desplazamiento y puede provocar asfixia e intoxicación al ingerirlo (Viramontes Ramos, Portillo Ruiz, & Nevárez Moorillón, 2020).

En la actualidad se han utilizado distintas técnicas de remediación con el propósito de eliminar estos contaminantes de los sitios afectados; por ejemplo, en la biorremediación se pueden utilizar microorganismos capaces de convertir los hidrocarburos en sustancias como el agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) (Behera et al., 2018). Los microorganismos como algunas especies de bacterias son capaces de utilizar los elementos constituyentes de los hidrocarburos como son carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), hidrógeno (H) y azufre (S) como fuente de energía para su crecimiento poblacional, por lo que en este artículo se destaca la importancia en la biorremediación de las bacterias nativas de sitios afectados por derrames de petróleo (Viramontes Ramos et al., 2020).

Problemáticas que generan los derrames de hidrocarburos

La contaminación del ambiente por hidrocarburos es un problema a nivel mundial derivado principalmente de los derrames de petróleo producto de actividades como la descarga de aguas residuales con restos del hidrocarburo, fugas en los tanques de almacenamiento y oleoductos subterráneos (Varjani & Upasani, 2017).

Una vez que el hidrocarburo contamina un sitio genera problemas al ser humano, así como a la flora y fauna locales (Hoang et al., 2020). La exposición de la fauna acuática a los hidrocarburos es tóxica para la misma, ya que se ve afectada la biodiversidad, así como la actividad pesquera por las alteraciones en el sistema reproductivo de los animales, alteración endocrina, daños en el ADN y malformación en el embrión (Behera et al., 2018; Wang, Liu, Dai, Luo, & Zhang, 2021). Las plantas que entran en contacto con el hidrocarburo sufren daños, ya que impide que accedan a la luz solar, además de no adquirir los nutrientes que necesita e impedir su desarrollo (Truskewycz et al., 2019). En la salud humana causa efectos negativos como dolor de cabeza, irritación de ojos y piel, dolor de garganta, problemas respiratorios, estornudos, tos, congestión nasal, náuseas, vómito, mareos, diarrea, disfunción renal, osteoporosis, diversos tipos de cáncer (de pulmón y nariz), inclusive causa alteraciones en el ADN (Orish, 2021).

Hidrocarburos y sus compuestos

Los hidrocarburos del petróleo también llamados hidrocarburos totales de petróleo (HTP) son clasificados como contaminantes prioritarios según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) (Miri, Naghdi, Rouissi, Kaur, & Martel, 2018). Están formados por dos tipos de compuestos de hidrocarburos que son los hidrocarburos volátiles y los extraíbles del petróleo; en el primer grupo se encuentran los hidrocarburos de cadena pequeña, que tienen de 6 a 10 carbonos como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno y el segundo grupo, en donde se encuentran los de cadena larga, que tienen de 10 a 40 carbonos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HTPs); estos últimos comprenden a los hidrocarburos alifáticos como los alcanos, alquenos, alquinos y los aromáticos, todos estos compuestos tienen una estructura estable químicamente, por lo que son considerados como recalcitrantes y contaminantes primarios (Hoang et al., 2021).

Bacterias

En la actualidad se ha destacado el uso de microorganismos con capacidad degradadora para poder disminuir la contaminación por hidrocarburos (Sales da Silva et al., 2020). Ejemplo de estos microorganismos son las bacterias capaces de utilizar el contaminante como fuente de energía y convertirlo en sustancias inocuas, lo que les permite remediar sitios contaminados (Rentería Arango & Rosero García, 2019). Existen enzimas que les brindan la capacidad de sobrevivir en sitios contaminados con hidrocarburos, como las enzimas dependientes del oxígeno denominadas monooxigenasas, lo que les facilitan un medio para emplear el hidrocarburo como sustrato (Das & Chandran, 2011).

Es importante destacar el uso de las bacterias nativas o autóctonas (figura 1), de gran interés en la degradación de contaminantes; para poder caracterizarlas y conocer mejor el mecanismo de degradación se pueden aislar directo del entorno afectado (Das & Chandran, 2011). Dichos microorganismos pueden degradar el contaminante mediante la remediación natural o convirtiéndolos en sustancias menos tóxicas o inocuas para el

ambiente; estas bacterias primero degradan los compuestos más sencillos de cadenas lineales y cortas, posteriormente los más complejos, como los aromáticos, los ramificados o con más de 20 carbonos (Viramontes et al., 2020).

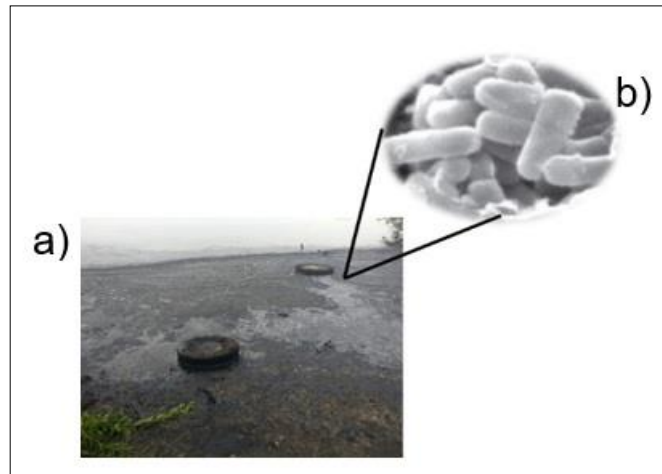


Figura 1. Bacterias nativas (*Pseudomonas aeruginosa* AT18) de sitios afectados por derrames de petróleo. La imagen a) es elaboración propia. La imagen b) es tomada de Pérez Silva et al. (2008).

En la tabla 1 se muestran ejemplos de bacterias eficaces empleadas en la biorremediación, otros géneros de estos microorganismos son: *Achromobacter*, *Marinobacter*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Flavobacter*, *Nocardia*, *Bravibacterium*, *Streptococc*, *Stenotrophomonas*, *Methylobacterium* y *Enterobacter*; las cuales se caracterizan por llevar a cabo la síntesis de enzimas con actividad hidrolasa, oxigenasa, desmetilasa, dehalogenasa, transferasa y oxidoreductasa, capaces de catalizar la degradación de los hidrocarburos en condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Wang, Wang, & Shaoa, 2018).

Tabla 1

Bacterias aisladas de sitios acuáticos con capacidad hidrolítica de hidrocarburos

Bacterias que degradan petróleo	Especificidad de hidrocarburos	Referencias
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> N6P6	Fenantreno y pireno	Mangwani et al. (2015)
<i>Halomonas</i> sp. strain MCTG39a	Hexadecano	Gutiérrez et al. (2015b)
<i>Cycloclasticus</i> sp. strain BG-2	Fenantreno	Gutiérrez et al. (2015a)
<i>Cycloclasticus</i> sp. 78-ME	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Mesina et al. (2016)
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> NP103	Fenantreno y pireno	Mangwani et al. (2016)
<i>Cupriavidus metallidurans</i> CH34	Tolueno	Espinoza Tofalos et al. (2018)
<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i> SdK644	Petróleo crudo	Zenati et al. (2018)
<i>Pseudomonas</i> sp. sp48	Fenol, naftaleno y pentadecano	Frag et al. (2018)
<i>Alcaligenes aquatilis</i> BU33N	Petróleo crudo y fenantreno	Mahjoubi et al. (2019)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> GOM1	Hexadecano	Muriel-Millán et al. (2019)
<i>Ralstonia pickettii</i>	Petróleo crudo	Purnomo et al. (2019)
<i>Alcanivorax</i> sp. 24	Alcanos	Zadjelovic et al. (2020)
<i>Halomonas pacífica</i> strain Cnaph3	Naftalina	Cheffi et al. (2020)
<i>Oleispira antarctica</i> RB-8	Alcanos alifáticos	Gregson et al. (2020)
<i>Halomonas</i> sp. SZN1	Pireno, indenopireno, criseno	Dell'Anno et al. (2020)

<i>Paracoccus</i> sp. MJ9, <i>Alcanivorax</i> sp. IO_7 <i>Staphylococcus</i> sp. CO100 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>halotolerante</i> (AHV-KH10)	Diesel Alcano Hidrocarburos alifáticos Diesel	Xu et al. (2020) Sinha et al. (2021) Hentai et al. (2021) Pourfadakari et al. (2021)
--	--	---

Nota: Elaboración propia.

Dentro de los mecanismos de biodegradación las bacterias pueden llevar a cabo la hidroxilación de los anillos aromáticos del benceno, tolueno, xileno y naftaleno. Además, oxidan las cadenas laterales de alquilo, ya que emplean enzimas oxigenasas como las monooxigenasas y las dioxigenasas para poder llevar a cabo la biodegradación aeróbica; mientras que la degradación anaeróbica es catalizada por bacterias que emplean aceptores terminales de electrones como sulfato, nitrato, manganeso, hierro y CO₂ (Kebede et al., 2022).

Sin embargo, para que la degradación se lleve a cabo de una manera más completa se deben de tomar en cuenta ciertos factores como las características genéticas de las bacterias que se van a emplear, el tamaño, la interacción microbiana (si se emplea cepa única o consorcios), la diversidad microbiana, la sinergia o antagonismo (competencia microbiana), las características del contaminante; por ejemplo, su estructura química, la concentración, biodisponibilidad, grado de toxicidad, además de los factores del sitio afectado, como temperatura y pH (Kebede, Tafese, Abda, Kamaraj, & Assefa, 2021). Un ejemplo de lo antes mencionado es que a temperaturas bajas la viscosidad del aceite aumenta; en los hidrocarburos de bajo peso molecular se reduce, lo que da como consecuencia que el proceso de degradación se retrase; por ello es importante considerar estos factores con la finalidad de determinar cuáles son las bacterias remediadoras adecuadas que se podrían emplear en la degradación de los contaminantes (Atlas, 1975).

Mecanismos de degradación de los hidrocarburos

Uno de los mecanismos que emplean las bacterias en la biorremediación es la producción de surfactantes; son moléculas que facilitan la degradación del contaminante, debido a que son producidas por organismos vivos se les denomina biosurfactantes; también son llamados tensoactivos, éstos modifican las condiciones de la superficie entre dos sustancias como agua e hidrocarburos, lo que impide que se mezclen y formen una solución homogénea (Viramontes Ramos et al., 2010). El agua y el hidrocarburo no se pueden mezclar debido a que poseen distinto grado de polaridad, ya que la molécula del agua posee átomos de hidrogeno (regiones cargadas positivamente), los cuales son atraídos por el átomo de oxígeno (región cargada negativa) de otras moléculas de agua; por otra parte, los hidrocarburos poseen moléculas no polares, ya que tienen de manera simétrica cadenas de carbonos e hidrógenos, por ello se repelen, prefieren unirse con moléculas semejantes a ellas (De la Rosa, Sánchez, & Ortiz, 2014).

Los biosurfactantes cuentan con grupos hidrofílicos (grupos polares) e hidrofóbicos (grupos no polares), por lo cual poseen afinidad por las moléculas polares y no polares (León, Contreras, & Ramos, 2016). Simplemente dirigen el extremo polar hacia las moléculas de agua y hacia el hidrocarburo el extremo no polar; al reducirse la tensión superficial también disminuyen las fuerzas de repulsión entre las diferentes fases, lo cual permite en este caso que el agua y el hidrocarburo interaccionen y se mezclen. Un ejemplo es el agua,

la cual tiene una tensión de 72 dinas/cm, al agregarle un biosurfactante dicho valor puede reducirse hasta 25 dinas/cm (Viramontes Ramos et al., 2020).

Es importante destacar que la tensión superficial puede variar en función de la concentración del biosurfactante, ya que a mayor concentración menos tensión y así el surfactante forma moléculas con una cabeza polar al exterior y una cola no polar al interior pegadas a una partícula en un medio no soluble llamado micela, formada por 50 a 100 monómeros de biosurfactante; esto sucede cuando la interfaz se llena de moléculas de biosurfactante, después unen las colas hidrofóbicas entre sí y dejan expuestas las cabezas hidrofílicas; a esto se le conoce como concentración crítica de micelas (CMC); en este proceso se centra la capacidad de que el biosurfactante pueda reducir la tensión superficial (Raiger & López, 2009).

Los biosurfactantes dividen la interfaz aire-agua para aumentar el contacto de la cabeza hidrofílica con el agua y poder disminuir el de la cola hidrofóbica; esto se lleva a cabo en concentraciones bajas de CMC. Por el contrario, en concentraciones altas los biosurfactantes comienzan a formar micelas y toda la superficie está saturada formando compuestos hidrofóbicos dentro de éstas, lo que genera las microemulsiones (León et al., 2016). Al proceso cuando una fase líquida se distribuye en forma de gotas microscópicas en otra fase continua líquida se le conoce como emulsión. Derivado del crecimiento de las bacterias en la interfaz agua-aceite, la emulsificación también aumenta el área superficial de las gotas, de esta manera éstas tienen contacto directo con las gotas del aceite que encapsula el biosurfactante; ha sucedido que estos microorganismos poseen la capacidad de utilizar el hidrocarburo del centro micelar por unión con la membrana celular (Viramontes Ramos et al., 2020).

Las bacterias en condiciones anaeróbicas realizan la degradación más agilizada y completa (figura 2) de los contaminantes orgánicos, el proceso oxidativo, la activación, además de la incorporación de oxígeno da lugar a una reacción enzimática que es de vital importancia; catalizada por algunas enzimas como las oxigenasas y peroxidadas; por otro lado, las vías de degradación transforman a los contaminantes en intercesores del metabolismo intermediario central; un claro ejemplo es el ciclo del ácido tricarbóxico. El acetil-CoA, succinato y piruvato son metabolitos iniciadores centrales que producen la biosíntesis de la biomasa celular, así como mediante la gluconeogénesis se sintetizan azúcares indispensables para diferentes biosíntesis (Fritsche & Hofrichter, 2000; Hommel, 1990).

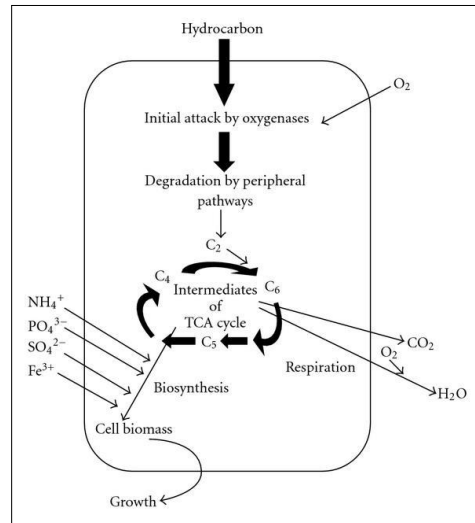


Figura 2. Principio fundamental de la degradación anaeróbica de hidrocarburos por microorganismos. Imagen tomada de Das & Chandran (2011).

CONCLUSIONES

En esta revisión se da a conocer la importancia de las bacterias nativas presentes en los sitios contaminados con algún hidrocarburo debido a que estos microorganismos cuentan con el potencial de producir biosurfactantes; moléculas útiles para degradar el contaminante y poder producir sustancias menos tóxicas o inocuas, como el CO₂ y agua. Como se mencionó existen múltiples estudios que demuestran la eficacia de las bacterias para degradar contaminantes como los hidrocarburos, como: *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Bravibacterium*, *Streptococc*, *Stenotrophomonas*, *Methylobacterium* y *Enterobacter*, por mencionar algunas. Por ello se considera que dichos microorganismos son una gran opción para implementarse en la técnica de biorremediación de ecosistemas acuáticos, lo que ayuda a mitigar una serie de efectos generados al ocurrir accidentes como los derrames de hidrocarburos.

REFERENCIAS

- Atlas, R. (1975). Effects of temperature and crude oil composition on petroleum biodegradation. *Journal of Applied Microbiology*, 30(3), 396-403. doi: 10.1128/am.30.3.396-403.1975
- Behera, B., Das, A., Sarkar, D., Weerathunge, P., Parida, P., Das, B., ... Bansal, V. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in inland aquatic ecosystems: Perils and remedies through biosensors and bioremediation. *Environmental Pollution*, 241, 212-233. doi: 10.1016/j.envpol.2018.05.016

- Cheffi, M., Hentai, D., Chebi, A., Mhiri, N., Sayadi, S., Marqués, A., & Chamkha, M. (2020). Isolation and characterization of a newly naphthalene-degrading *Halomonas pacifica*, strain Cnaph3: Biodegradation and biosurfactant production studies. *3 Biotech*, *10*(89). doi: 10.1007/s13205-020-2085-x
- Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International*, *2011*, e941810, 13 pages. doi: 10.4061/2011/941810
- De la Huz, R., Lastra, M., & López, J. (2011). *Other environmental health issues: Oil spill. Encyclopædia of Environmental Health (Second Edition)*, 792-796. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11156-X
- De la Rosa, N., Sánchez, E., & Ortiz, M. (2014). Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, *4*(1), 47-67. doi: <http://www.solabiaa.org/ojs3/index.php/RELBA/article/view/43>
- Dell'Anno, F., Brunet, C., van Zyl, L., Trindade, M., Golyshin, P., Dell'anno, A., ... Sansone, C. (2020). Degradation of hydrocarbons and heavy metal reduction by marine bacteria in highly contaminated sediments. *Microorganisms*, *8*, 1402. doi: 10.3390/microorganisms8091402
- Espinoza Tofalos, A., Daghighi, M., González, M., Papacchini, M., Franzetti, A., & Seeger, M. (2018). Toluene degradation by *Cupriavidus metallidurans* CH34 in nitrate-reducing conditions and in Bioelectrochemical Systems. *FEMS Microbiology Letters*, *365*(12), e fny119. doi: 10.1093/femsle/fny119
- Farag, S., Solimán, N., & Abdel-Fattah, Y. (2018). Optimización estadística de la biodegradación del petróleo crudo por una bacteria marina local aislada *Pseudomonas* sp. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, *16*(2), 409-420. doi: 10.1016/j.jgeb.2018.01.001
- Fritsche, W., & Hofrichter, M. (2000). Aerobic degradation by microorganisms. *Environmental Processes II*, *11*, 146-155. doi: 10.1002/9783527620951.ch6
- Gregson, B., Metodieva, G., Metodiev, M., Golyshin, P., & McKew, B. (2020). Protein expression in the obligate hydrocarbon-degrading psychrophile *Oleispira antarctica* RB-8 during alkane degradation and cold tolerance. *Environmental Microbiology*, *22*(5), 1870-1883. doi: 10.1111/1462-2920.14956
- Gutiérrez, T., Biddle, J., Teske, A., & Aitken, M. (2015a). Cultivation-dependent and cultivation-independent characterization of hydrocarbon-degrading bacteria in Guaymas Basin sediments. *Frontiers in Microbiology*, *6*. doi: 10.3389/fmicb.2015.00695
- Gutiérrez, T., Whitman, W., Huntemann, M., Copeland, A., Chen, A., Kypides, N., ... Mijailova, N. (2015b). Genome sequence of *Halomonas* sp. Strain MCTG39a, a hydrocarbon-degrading and exopolymeric substance-producing bacterium. *Genome Announcement*, *3*(4), 79-315. doi: 10.1128/genomeA.00793-15
- Hentai, D., Cheffi, M., Hadrich, F., Makhloufi, N., Rabanal, F., Manresa, A., ... Chamkha, M. (2021). Investigation of halotolerant marine *Staphylococcus* sp. CO100, as a promising hydrocarbon-degrading and biosurfactant-producing bacterium, under saline conditions. *Journal of Environmental Management*, *277*, 111-480. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111480
- Hoang, S., Lamb, D., Seshadri, B., Sarkar, B., Choppala, G., Kirkham, M., & Bolan, N. (2020). Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, *401*, e123282. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123282
- Hoang, S., Sarkar, B., Seshadri, B., Lamb, D., Wijesekara, H., Vithanage, M., ... Bolan, N. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon contaminated hazardous soils using

- organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416, e125702. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125702
- Hommel, R. K. (1990). Formation and physiological role of biosurfactants produced by hydrocarbon-utilizing microorganisms Biosurfactants in hydrocarbon utilization. *Biodegradation*, 1, 107-119. doi: 10.1007/BF00058830
 - Kebede, G., Abera, S., Mekonen, E., Tafese, T., Abdi, A., Abda, E.,... Assefa, F. (2022). Isolation and characterization of diesel-degrading bacteria from hydrocarbon-contaminated sites, flower farms, and soda lakes. *International Journal of Microbiology*, e5655767. doi: 10.1155/2022/5655767
 - Kebede, G., Tafese, T., Abda, E., Kamaraj, M., & Assefa, F. (2021). Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: Mechanisms and impacts. *Journal of Chemistry*, e9823362. doi: 10.1155/2021/9823362
 - León, M., Contreras, A., & Ramos, J. (2016). Biosurfactantes en la industria petrolera. *Semilleros*, 2(1), 48-59. Recuperado de <https://core.ac.uk/reader/155272480>
 - Mahjoubi, M., Aliyu, H., Capello, S., Naifer, M., Souissi, Y., Cowan, D., & Cherif, A. (2019). The genome of *Alcaligenes aquatilis* strain BU33N: Insights into hydrocarbon degradation capacity. *PLoS ONE*, 14(9). doi: 10.1371/journal.pone.0221574
 - Mangwani, N., Kumari, S., & Das, S. (2015). Involvement of quorum sensing genes in biofilm development and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a marine bacterium *Pseudomonas aeruginosa* N6P6. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(23). doi: 10.1007/s00253-015-6868-7
 - _____ (2016). Effect of synthetic N-acylhomoserine lactones on cell-cell interactions in marine *Pseudomonas* and biofilm mediated degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemical Engineering Journal*, 302, 172-186. doi: 10.1016/j.cej.2016.05.042
 - Marris, C., Kompella, S., & Miller, M. (2020). Polyaromatic hydrocarbons in pollution: A heart-breaking matter. *The Journal Physiology*, 598(2), 227-247. doi: 10.1113/JP278885
 - Mesina, E., Denaro, R., Crisafí, F., Smedile, F., Capello, S., Genovés, M.,... Ferrer, M. (2016). Genome sequence of obligate marine polycyclic aromatic hydrocarbons-degrading bacterium *Cycloclasticus* sp. 78-ME, isolated from petroleum deposits of the sunken tanker Amoco Milford Haven, Mediterranean Sea. *Mar Genomics*, 25, 11-13. doi: 10.1016/j.margen.2015.10.006
 - Miri, S., Naghdi, M., Rouissi, T., Kaur, B., & Martel, R. (2018). Recent biotechnological advances in petroleum hydrocarbons degradation under cold climate conditions: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(7), 553-586. doi: 10.1080/10643389.2018.1552070
 - Mirjani, M., Soleimani, M., & Salari, V. (2021). Toxicity assessment of total petroleum hydrocarbons in aquatic environments using the bioluminescent bacterium *Aliivibrio fischeri*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111-554. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111554
 - Muriel-Millán, L., Rodríguez-Mejía, J., Godoy-Lozano, E., Rivera-Gómez, N., Gutiérrez-Ríos, R., Morales-Guzmán, D.,... Pardo-López, L. (2019). Functional and genomic characterization of a *Pseudomonas aeruginosa* strain isolated from the Southwestern Gulf of Mexico reveals an enhanced adaptation for long-chain alkane degradation. *Frontiers in Marine Science*, 6, 572. doi: 10.3389/fmars.2019.00572
 - Orish, E. (2021). Crude oil and public health issues in Niger Delta, Nigeria: Much ado about the inevitable. *Environmental Research*, 194. doi: 10.1016/j.envres.2021.110725
 - Pérez, Y., Lopez, S., Rodríguez, A., & Ramos, S. (2019). Evaluación de impacto socioambiental, por derrame de petróleo de un ducto en Comalcalco, Tabasco.

- Journal of Basic Sciences*, 5(15), 134-152. Recuperado de <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs/article/view/3574>
- Pérez Silva, R. M., Camacho Pozo, M. I., Gómez Montes de Oca, J. M., Ábalos Rodríguez, A., Viñas, M., & Cantero Moreno, D. (2008). Aislamiento y selección de una cepa bacteriana degradadora de hidrocarburos a partir de suelos contaminados con petróleo. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 39(1), 44-51. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181214889004.pdf>
 - Pourfadakari, S., Ghafari, S., Takdastán, A., & Jorfi, S. (2021). A salt resistant biosurfactant produced by moderately halotolerant *Pseudomonas aeruginosa* (AHV-KH10) and its application for bioremediation of diesel-contaminated sediment in saline environment. *Biodegradación*, 32(3), 327-341. doi: 10.1007/s10532-021-09941-2
 - Purnomo, A., Rizqi, H., Harmelia, L., Anggraeni, S., Melati, R., Damayanti, Z., Shafwah, O., & Kusuma, F. (2019). Biodegradation of crude oil by *Ralstonia pickettii* under high salinity medium. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(3), 377-380. doi: 10.11113/mjfas.v15n3.1181
 - Raiger, L., & López, N. (2009). Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Química Viva*, 8(3), 146-161. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86320633002.pdf>
 - Rentería Arango, M. A., & Rosero García, D. A. (2019). Estudios sobre la biorremediación en Colombia. *Hechos Microbiológicos*, 10(1-2), 39-48. doi: 10.17533/udea.hm.v10n1a05
 - Sales da Silva, I. G., Gomes de Almeida, F. C., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Casazza A. A., Converti, A., & Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13(18), e4664. doi: 10.3390/en13184664
 - Sinha, R., Krishnan, K., & Kurian, P. (2021). Complete genome sequence and comparative genome analysis of *Alcanivorax* sp. IO_7, a marine alkane-degrading bacterium isolated from hydrothermally influenced deep seawater of the southwestern Indian ridges. *Genomics*, 113(1 pt. 2), 884-891. doi: 10.1016/j.ygeno.2020.10.020
 - Truskewycz, A., Gundry, T. D., Khudur, L. S., Kolobaric, A., Taha, M., Aburto-Medina, A., ... Shahsavari, E. (2019). Petroleum hydrocarbon contamination in terrestrial ecosystems-fate and microbial responses. *Molecules*, 24(18), e 3400. doi: 10.3390/molecules24183400
 - Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 120, 71-83. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.02.006
 - Viramontes Ramos, S., Portillo Ruiz, M. C., & Nevárez Moorillón, G. V. (2020). Bacterias que se nutren de hidrocarburos. *Novedades Científicas*, 71(4), 72-79. Recuperado de <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-71-numero-4/294-novedades-cientificas/836-bacterias-que-se-nutren-de-hidrocarburos>
 - Viramontes Ramos, S., Portillo Ruiz, M. C., Ballinas Casarrubias, M. L., Torres Muñoz, J. V., Rivera Chavira, B. E., & Nevárez Moorillón, G. V. (2010). Selection of biosurfactant/bioemulsifier – producing bacteria from hydrocarbon– contaminated soil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41(3), 668-675. doi: 10.1590/S1517-83822010000300017
 - Wang, W., Wang, L., & Shaoa, Z. (2018). Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Degradation Pathways of the Obligate Marine PAH Degradator *Cycloclasticus* sp. Strain P1. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(21). doi: 10.1128/AEM.01261-18
 - Wang, Y., Liu, M., Dai, Y., Luo, Y., & Zhang, S. (2021). Health and ecotoxicological risk assessment for human and aquatic organism exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in the Baiyangdian Lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 574-586. doi: 10.1007/s11356-020-10480-1
 - Xu, M., Fu, X., Gao, Y., Duan, L., Xu, C., Sun, W.,... Xiao, X. (2020). Characterization of a biosurfactant-producing bacteria isolated from marine environment: Surface activity,

chemical characterization and biodegradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5). doi: 10.1016/j.jece.2020.104277

- Zadjelovic, V., Gibson, M., Dorador, C., & Christie, J. (2020). Genome of *Alcanivorax* sp. 24: A hydrocarbon degrading bacterium isolated from marine plastic debris. *Marine Genomics*, 49, 100-686. doi: 10.1016/j.margen.2019.05.001
- Zenati, B., Chebi, A., Badis, A., Eddouaouda, K., Boutoumi, H., El Hattab, M.,.... Chamkha, M. (2018). A non-toxic microbial surfactant from *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* SdK644 for crude oil solubilization enhancement. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154, 100-107. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.032



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.