

# Bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos

Roger Alberto Rabelo Florez<sup>1</sup>  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Marco Antonio Márquez<sup>2</sup>  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Recibido: 03 de junio de 2020

Aceptado: 29 de enero de 2022

## Resumen

El objetivo principal del presente es artículo realizar una revisión bibliográfica acerca de las bacterias Gram negativas más relevantes que biodegradan hidrocarburo y revisar las técnicas de biodegradación utilizadas. Esta revisión se desarrolló en dos etapas. La primera, es un mapeo científico del tema, a través de unos parámetros de búsqueda bibliométrica registrada en Scopus, Redalyc, Scielo, Dialnet, Latindex, Nature Microbiology, entre otras, y en el motor de búsqueda de Google Académico, y la segunda, un análisis de red que permite identificar los documentos más relevantes. En este proceso, se encontró que los géneros bacterianos Gram negativos más representativos en biodegradar hidrocarburo son *Alcanivorax* spp., *Bacteriovorax* spp., *Burkholderia* spp., *Chromobacterium* spp., *Citrobacter* spp., entre otras. Estas bacterias logran biodegradar los hidrocarburos, gracias a la síntesis de los biosurfactantes, a través de las técnicas *in situ* y *ex situ*. Esta revisión es importante, pues brinda suficiente información referente a las bacterias que logran biodegradar el petróleo y sus derivados, relaciona los principales biosurfactantes usados y describe las técnicas de biodegradación.

**Palabras clave:** Bacteria, biodegradación, hidrocarburo, biosurfactante

Doi: 10.25100/rc.v24i2.9935

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5247-8888>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4181-8963>

## Gram-negative hydrocarbon-biodegrading bacteria

### Abstract

The objective of this article is to review the most relevant Gram-negative bacteria capable of biodegrading hydrocarbon, and to review the biodegradation techniques used. This review was developed in two stages. The first is a scientific mapping of the subject, through databases like Scopus, Redalyc, Scielo, Dialnet, Latindex, Nature Microbiology, among others, and in the Google Academic. The second stage is an analysis to identifying the most relevant documents. In this process, it was

found that the most representative Gram-negative bacterial genera in hydrocarbon biodegradation are *Alcanivorax* spp., *Bacteriovorax* spp., *Burkholderia* spp., *Chromobacterium* spp., *Citrobacter* spp., among others. These bacteria can biodegrade hydrocarbons through biosurfactants synthesis by *in situ* and *ex situ* techniques. This review is important because it provides sufficient information on the bacteria that biodegrade oil and its derivatives, lists the main biosurfactants used and describes the biodegradation techniques.

**Keywords:** Bacteria, biodegradation, hydrocarbon, biosurfactant

## 1 Introducción

La contaminación por hidrocarburos del petróleo es una problemática de carácter mundial y de amplia distribución geográfica, teniendo en cuenta que - independiente de la zona afectada (lagos, suelos, zonas freáticas, ríos y playas) - por procesos biológicos y físicos, los hidrocarburos tienen como destino final los mares y océanos <sup>(1)</sup>. Los derrames de hidrocarburos, accidentales o provocados, afectan tanto el suelo como el agua, así como también causan una alteración a la calidad del paisaje <sup>(2)</sup>.

Los derrames más reconocidos ocurrieron en la costa de Alaska en 1998, donde se involucró el buque tanque Exxon Valdez y en la costa de Galicia en 2002 por la ruptura del buque tanque Prestige. En ambas experiencias se demostró la importancia del papel de los microorganismos para biorremediar los hidrocarburos derramados, tanto en el agua de mar como en los sedimentos intermareales <sup>(3)</sup>.

La contaminación de cuerpos de agua de mar por derrames accidentales de hidrocarburos, es un problema ambiental y de salud pública en el territorio colombiano, a causa de la explotación, transporte y refinación de los hidrocarburos, generando problemas de salud en la población circundante.

Desde el punto de vista de salud pública, hay una afectación en el ámbito social que incluye los sistemas de producción, la economía y las formas de vida de las poblaciones, así como las consecuencias en sus organismos debido a los efectos de estos compuestos, tóxicos para los humanos (mutagénicos y carcinogénicos) y para los seres vivos en sus diversas formas <sup>(4)</sup>.

Los hidrocarburos policíclicos (antraceno, pireno, fenantreno, benzopirenos) al entrar en contacto con la piel ocasionan irritación, enrojecimiento y lesiones y bajo ciertas condiciones pueden producir cáncer de piel, de testículo y de pulmones; de igual forma los hidrocarburos aromáticos bencénicos (benceno, xileno, tolueno), causan cáncer y malformaciones congénitas <sup>(5)</sup>.

Las bacterias juegan un papel importante en la biodegradación de contaminantes en el ambiente <sup>(6)</sup>. Entre las bacterias que utilizan petróleo para su crecimiento y mantenimiento, conocidas como degradadoras de hidrocarburos, se destacan varias especies del género *Pseudomonas* <sup>(7-9)</sup>, que, por su versatilidad metabólica, son capaces de convertir sustratos habitualmente no degradables, en metabolitos fácilmente asimilables o susceptibles de ser catalizados enzimáticamente <sup>(10)</sup>. Las bacterias Gram negativas son en su mayoría, las que se aíslan e identifican como biodegradadoras de hidrocarburos; se ha reportado que este

tipo de microorganismos posee ciertas ventajas respecto a las bacterias Gram positivas para llevar adelante procesos degradativos, debido a la presencia de lipopolisacáridos (LPS) en su membrana externa, lo que facilita la formación y estabilización de emulsiones, que a su vez, contribuye a incrementar el contacto con contaminantes de tipo lipídico, tales como los hidrocarburos <sup>(11)</sup>.

Este documento tiene como objetivo revisar en fuentes bibliográficas las bacterias Gram negativas más relevantes que biodegradan hidrocarburo y revisar las técnicas de biodegradación utilizadas.

## 2 Método

Se realizó un mapeo científico del tema, a través de búsqueda bibliométrica de la producción científica registrada en Scopus, Redalyc, Scielo, Dialnet, Latindex, Nature Microbiology, entre otras y en el motor de búsqueda de Google Académico. Posteriormente, se hizo un análisis de red que permitió identificar los documentos más relevantes sobre bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos. Se revisaron los resúmenes de cada artículo y fueron seleccionados los que cumplieran con la temática.

### 2.1 Mapeo científico

Con el fin de realizar un análisis de producción académica, se utilizaron los siguientes parámetros de búsqueda (Tabla 1).

**Tabla 1.** Parámetros de búsqueda bibliométrica de la producción científica de documentos más relevantes sobre bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos

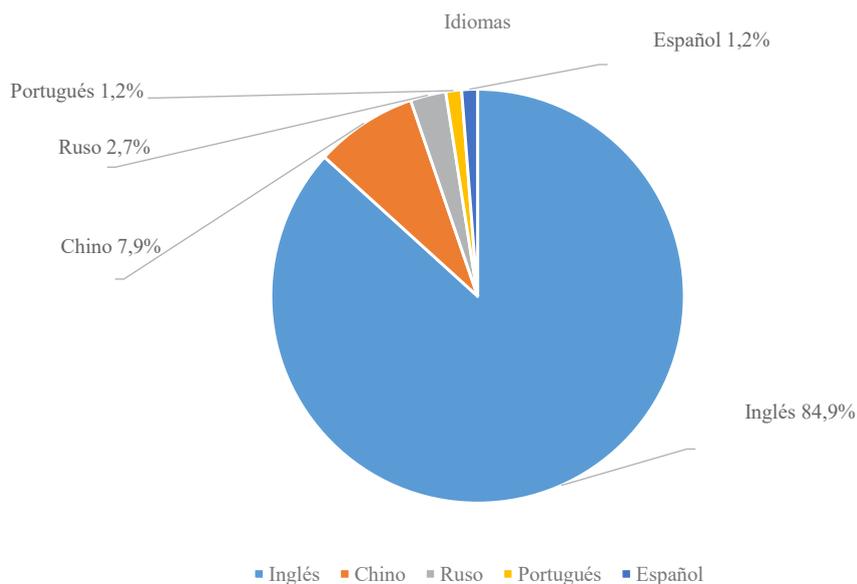
Bases de datos	Scopus
Periodo de consulta en años	2000-2021
Fecha de consulta	Diciembre 5 de 2021
Tipo de documento	Artículo, libro, capítulo de libro, documento de conferencia
Tipo de revista	Todos los tipos
Campos de búsqueda	Título
Términos de búsqueda	“microorganism” and “biodegradation” or “hydrocarbon” or “biosurfactants”
Idioma	inglés, chino, ruso, portugués y español
Resultados	331

Los criterios de inclusión fueron los siguientes: estudios originales y de revisión de bacterias aisladas e identificadas con la finalidad de biodegradación de hidrocarburos. Por otro lado, se excluyeron estudios publicados antes del 2000, no se tuvo en cuenta material periodístico o de opinión. De los registros en Scopus fueron extraídas las referencias (bibliografía). Al involucrar en los parámetros de búsqueda los términos en diferentes idiomas, se abarcó la mayor cantidad de registros al interior de estas bases de datos, puesto

que es una variable muy importante al momento de los resultados. La mayor cantidad de publicaciones está en inglés.

### 3 Resultados

Se identificó que en Scopus, Redalyc, Scielo, Dialnet, Latindex, Nature Microbiology, entre otras y en el motor de búsqueda de Google Académico el 84,9% de las publicaciones sobre el tema o relacionadas se encuentran en inglés, mientras que, en chino, ruso, portugués y español, respectivamente, solo el 7,9%, 2,7%, 1,2% y 1,2% (Figura 1). Esto se debe a que el inglés es el idioma dominante en estas bases de datos, además, estas revistas y autores procuran realizar sus publicaciones en este idioma para aumentar su visibilidad <sup>(12)</sup>.



**Figura 1.** Porcentaje de publicación documentos en diferentes idiomas y más relevantes sobre bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos.

Fuente: Elaboración propia, 2021

#### 3.1 Bacterias que utilizan hidrocarburos como fuente de energía.

Los microorganismos que habitan en diferentes ambientes acuáticos y terrestres, según el clima y región geográfica son muy diversos y capaces de utilizar cualquier sustrato orgánico que se encuentre en su medio, por consiguiente, estos microorganismos tienen la capacidad de usar hidrocarburos, como única fuente de carbono y energía <sup>(10)</sup>. Las bacterias *Klebsiella* sp., *Chromobacterium* sp., *Flavimonas orizihabitans*, *Enterobacter cloacae*, *Bacillus brevis*, *B. pumillus* y *B. cereus*. *Klebsiella* sp., tienen la capacidad de tolerar hidrocarburos de petróleo <sup>(11)</sup>.

El papel de las bacterias en la biodegradación y/o biorremediación de hidrocarburos es muy importante, ya que pueden biodegradar los hidrocarburos tanto por la vía anaeróbica como la aeróbica.

### 3.1.1 Vías aerobia y anaerobia

Las oxigenasas son enzimas que catalizan la incorporación de oxígeno en los compuestos orgánicos, existen dos clases: las dioxigenasas, que catalizan la incorporación en un compuesto orgánico de los dos átomos de oxígeno en la molécula, y las monoxigenasas, que catalizan la incorporación de uno solo de los dos átomos de oxígeno de la molécula de  $O_2$  y la reducción del otro átomo a  $H_2O$  <sup>(13)</sup>.

En el metabolismo anóxico del hexano se modifica en el átomo de carbono 2 por unión de una molécula de fumarato, un intermediario  $C_4$  del ciclo del ácido cítrico y se forma el compuesto 1- metilpentilsuccinato, luego la adición enzimática de fumarato, oxigena eficazmente el hexano y permite catabolizar anaerobiamente la molécula; tras la adición de coenzima A, se producen una serie de reacciones que incluyen la beta-oxidación y la regeneración del fumarato; los electrones liberados durante la beta-oxidación generan fuerza protonmotriz y después son consumidos en la reducción del nitrato o el sulfato <sup>(14)</sup>.

## 4 Antecedentes

Varios estudios han identificado y referenciado a las bacterias biodegradadoras de hidrocarburos del género *Pseudomonas* <sup>(8-10, 15, 16)</sup>, *Ochrobacterium* (*Ochrobactrum*) <sup>(16, 17)</sup>, *Vibrio* <sup>(15)</sup>, *Flavobacterium* <sup>(15, 16)</sup>, *Alcanivorax*, *Cycloclasticus*, *Oleiphilus*, *Oleispira*, *Marinobacter*, *Neptunomonas*, *Pseudoalteromonas*, *Aeromonas*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Sphingomonas* y *Geobacillus* <sup>(15)</sup>.

En varios estudios, a partir de ambientes contaminados con petróleo se aisló e identificó la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* <sup>(18, 19)</sup>. En otro estudio, aislaron e identificaron diferentes microorganismos como *Pseudomonas* sp. <sup>(16, 18, 20)</sup>. En otro trabajo similar, utilizaron comunidades bacterianas para la biodegradación del petróleo crudo <sup>(21)</sup>. De igual forma, otros investigadores, utilizaron bacterias para biodegradar hidrocarburos, en el que se buscaron la respuesta de las comunidades microbianas indígenas al petróleo crudo en la columna de agua profunda del Mediterráneo Oriental <sup>(22)</sup>. Luego, se utilizó *Pseudomonas aeruginosa*, para biodegradar petróleo crudo en agua de mar <sup>(23)</sup>.

Seguidamente, en otra investigación se demostró la presencia de los géneros bacterianos *Colwelliaceae*, *Alteromonadaceae*, *Methylococcales*, *Alcanivorax*, *Bacteriovorax* y *Phaeobacter*, biodegradando hidrocarburos <sup>(24)</sup>.

En Colombia en zonas del pozo petrolero de San Sebastián, en Lórica, Córdoba, se aislaron e identificaron bacterias *Pseudomonas* <sup>(25)</sup>, *Burkholderia* <sup>(26)</sup>, *Klebsiella*, *Acinetobacter*, *Enterobacter* <sup>(25)</sup> y *Citrobacter* <sup>(26)</sup>. En un estudio más reciente se logró aislar e identificar la bacteria *Paraburkholderia aromaticivorans* BN5 del suelo contaminado con petróleo <sup>(27)</sup>.

Recientemente en China, infirieron la presencia de un grupo bacterias perteneciente al filo *Atribacteria*, el cual presenta genes que biodegradan hidrocarburos en ambientes subterráneos de yacimientos de petróleo <sup>(28)</sup>. En estos estudios se demostró que *Acinetobacter* sp. (47,1%) y *Pseudomonas* sp. (19,8%) fueron los principales en la degradación del petróleo crudo <sup>(29)</sup>.

## 5 Biosurfactantes

Las bacterias que crecen en presencia de hidrocarburos, producen una serie de sustancias con propiedades tenso-activas llamadas biosurfactantes (BS) capaces de solubilizar compuestos no polares, como los contenidos en el petróleo, además estas moléculas tienen la propiedad de estimular el crecimiento microbiológico ayudando así a acelerar la biorremediación en las zonas contaminadas <sup>(30)</sup>.

Los BS son moléculas orgánicas tensioactivas producidas sobre superficies vivas, en su mayoría en superficies de células microbianas o excretadas al medio, que ayudan la eliminación de las partículas adheridas al contaminante y dan lugar a un descenso significativo de la tensión superficial y/o interfacial. Al usarlos aumentan los procesos de biodegradación de ambientes contaminados con compuestos químicos derivados del petróleo <sup>(31)</sup>.

Los BS son moléculas anfipáticas producidas por bacterias, hongos y levaduras. La parte hidrofílica puede estar constituida por: aminoácidos, péptidos aniónicos o catiónicos y carbohidratos y la parte hidrofóbica por ácidos grasos saturados o insaturados <sup>(32)</sup>.

Los BS son más efectivos que los surfactantes químicos en incrementar la biodisponibilidad de los compuestos hidrofóbicos, por otra parte, son más amigables al ambiente <sup>(30)</sup>.

Estos BS pueden ser de bajo peso molecular y de alto peso molecular, los de bajo peso molecular son generalmente glicolípidos, lipopéptidos, aminoácidos modificados y ácidos grasos, son más efectivos para disminuir la tensión superficial e interfacial del medio. Los de alto peso molecular son polisacáridos, proteínas, lipoproteínas o una mezcla compleja y son más efectivos como estabilizantes de emulsiones aceite con agua <sup>(33-35)</sup>.

Algunos biosurfactantes son: ramnolípidos, trehalolípidos, celobiolípidos, lípidos polioles, diglicosil diglicéridos, lipopolisacáridos, arthrofactina, lichenysin A, lichenysin B, surfactina, viscosin, ornitina, lisina, fosfolípidos, sulfonilípidos, ácidos grasos (ácido corinomicólico, espiculispórico, etc), alasan, streptofactin, surfactantes particulados, biosur PM <sup>(35)</sup>.

## 6 Géneros de bacterias Gram negativas más representativas

Las bacterias biodegradadoras de hidrocarburos, son un grupo de bacterias que pueden ser tanto Gram positivas como Gram negativas, que logran tolerar la presencia de hidrocarburos, en el suelo como en cuerpos de agua, a continuación, se describen algunos géneros que tienen la capacidad de biodegradar el petróleo y sus derivados:

### *Acinetobacter*

Este género incluye a bacilos Gram negativos de amplia distribución mundial <sup>(34)</sup>, que al microscopio se observan como bacilos gruesos muy cortos, cercanos a la forma cocoide, son inmóviles, no fermentan glucosas, son oxidasa-negativos, no esporulados negativo a la prueba Voges-Proskauer. En un estudio de biodegradación de hidrocarburos se utilizó un consorcio bacteriano entre ellas *Acinetobacter bouvetii* <sup>(36)</sup>. Este microorganismo

produce los BS tipo vesículas, fosfolípidos, surfactantes particulados, lipopolisacáridos y alasan<sup>(8, 35)</sup>. Además biodegrada el naftaleno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno y criseno<sup>(37)</sup>.

### ***Aeromonas***

Son aerobios facultativos<sup>(14)</sup>, sin embargo, se refiere que son bacilos Gram negativos, anaerobio facultativo, son microorganismos de vida libre y ubicuos<sup>(38)</sup>, son móviles, oxidasa positivos, catalasa-positivo, fermentadores de glucosa<sup>(39)</sup>. En un estudio que se realizó para la biodegradación del hidrocarburo del aceite diésel, *Aeromonas hydrophila* fue la mejor bacteria que biodegradó este compuesto químico<sup>(40)</sup>. Esta especie biodegrada fenantreno<sup>(37)</sup>, además el hexano<sup>(41)</sup>, al fenantreno y al criseno<sup>(15)</sup>.

### ***Alcanivorax***

Este género bacteriano es uno de los más relevantes que biodegradan hidrocarburos. Algunas de sus especies están especializadas en la degradación del petróleo; por ejemplo, la bacteria *Alcanivorax borkumensis* crece únicamente en hidrocarburos, en ácidos grasos o en piruvato<sup>(14)</sup>.

El término *Alcanivorax*, etimológicamente deriva de los vocablos latinos *alcanum* y *vorax*, y estrictamente significa devorador de alcanos. Actualmente el género está formado por seis especies, *A. borkumensis*, *A. jadensis*, *A. venustensis*, *A. dieselolei*, *A. balearicus* y *A. hongdengensis*; son bacilos Gram negativos con un grosor aproximado de 0,6 y 0,8  $\mu\text{m}$  y una longitud que oscila entre 1,6 y 2,5  $\mu\text{m}$ , aunque son ligeramente más pequeños (1,0-1,5  $\mu\text{m}$ ) cuando crecen en hidrocarburos como única fuente de carbono; generalmente son bacterias no flageladas o con un único flagelo polar y su metabolismo es estrictamente aerobio; son halófilas, requieren para crecer al menos iones  $\text{Na}^+$ , aunque algunas especies tienen requerimientos iónicos más complejos, y por lo general capaces de crecer en presencia de altas concentraciones de  $\text{NaCl}$ ; son quimiorganótrofos y son capaces de usar ácidos grasos de cadena corta y alcanos como única fuente de carbono; además, pueden crecer utilizando acetato o piruvato como fuente de carbono<sup>(42)</sup>. Estos microorganismos producen los BS tipo glicolípidos y lípidos de soforosa<sup>(43)</sup>.

### ***Burkholderia***

Este género es Gram negativo, son quimiorganótrofas con metabolismo respiratorio estricto, son aerobias y anaerobias facultativas<sup>(14)</sup>, son bacilos rectos, oxidasa y catalasa positivos, mesófilos, no esporulados, móviles con un flagelo polar único o bien con un penacho de flagelos polares según las especies<sup>(39)</sup>. Este género puede biodegradar naftaleno, fenantreno, criseno y benzo( $\alpha$ )antraceno<sup>(37)</sup>, y también el hexano<sup>(41)</sup>.

### ***Chromobacterium***

Son bacilos Gram negativos, se encuentran en el suelo y agua, son aerobios facultativos, fermentan azúcares<sup>(14)</sup>. Algunas especies, se presentan como coco bacilo, móviles a través de un flagelo polar, su rango de crecimiento es de 15 y 40 °C, oxidasa y catalasa positivo<sup>(44)</sup>. Este género puede degradar hidrocarburos tipo diésel<sup>(1)</sup>.

### ***Citrobacter***

Este género se encuentra con frecuencia en agua, alimentos, tierra y ciertos animales <sup>(45)</sup>. Son bacilos Gram negativos móviles, aerobios, fermentan la lactosa, algunos utilizan citrato otros no <sup>(14)</sup>. También puede degradar hidrocarburos tipo diésel <sup>(11)</sup>.

### ***Colwellia***

Son bacterias barófilas facultativas, Gram negativos, habitan en las superficies de cuerpos acuáticos y en muestras de suelos de ambientes con temperaturas bajas permanentes, este género puede sobrevivir a -1°C y tiene la capacidad de movilizarse en estas condiciones <sup>(46)</sup>. Este género puede degradar hidrocarburos policíclicos <sup>(24)</sup>.

### ***Cycloclasticus***

Pertenecen a las Proteobacterias Gram negativas <sup>(11)</sup>. Las especies de *Cycloclasticus* son ubicuas en las regiones del océano ricas en petróleo y son conocidas por su capacidad de degradar los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP); este género utiliza hidrocarburos aromáticos, incluidos bifenilo, naftaleno, fenantreno, tolueno y xilenos, como únicas fuentes de carbono y energía, mientras que no pueden utilizar azúcares y aminoácidos <sup>(47)</sup>. También puede degradar naftaleno, acenafteno, fenantreno y antraceno <sup>(37)</sup>.

### ***Enterobacter***

Son bacilos Gram negativos aerobios facultativos, que no esporulan y que son inmóviles o móviles por flagelos peritricos, son oxidasa negativa y catalasa positiva <sup>(14)</sup>. *Enterobacter cloacae* es biodegradadora de hidrocarburo <sup>(1)</sup>. Este microorganismo logra biodegradar hexano <sup>(41)</sup>.

### ***Flavobacterium***

Son bacilos Gram negativos y sacarolíticos, se desplazan por deslizamiento, se encuentran principalmente en ambientes acuáticos, así como en alimentos, son aerobias estrictas, aunque algunas especies reducen los nitratos por respiración anaerobia, degradan almidón y proteínas <sup>(14)</sup>. Este género de bacterias puede biodegradar el fenantreno, antraceno <sup>(37)</sup> y el hexano <sup>(41)</sup>. Se destacan *F. saliserosum*, *F. terrae* y *F. saliserosum*, con mayor potencial de biodegradación de hidrocarburos <sup>(16)</sup>.

### ***Klebsiella***

Son bacilos Gram negativos aerobios facultativos, no esporulados, oxidasa negativo y catalasa positivos <sup>(14)</sup>, se encuentran más frecuentemente en el suelo y en el agua <sup>(14, 48)</sup> que logra biodegradar hidrocarburos <sup>(1)</sup>. En un estudio, se demostró que *Klebsiella oxytoca* crece a concentraciones altas de petróleo crudo, en comparación con otras bacterias reportadas como biodegradadoras, esto la convierte en un potente microorganismo para el tratamiento de limpieza de contaminación por petróleo <sup>(48)</sup>. Este género de bacteria logra biodegradar el hexano <sup>(41)</sup>.

### ***Marinobacter***

Son Gram negativas, quimioheterotróficas y halófilas, en forma de bastón; se caracterizan por utilizar hidrocarburos aromáticos y alifáticos como sus únicas fuentes de carbono y energía; las especies más representativas que biodegradan hidrocarburos son *M. hydrocarbonoclasticus*, *M. aquaeolei*, *M. maritimus* y *M. algicola*; recientemente se demostró que *M. vinifirmus* degrada efectivamente tolueno, benceno, etilbenceno y xileno <sup>(49)</sup>, también pueden oxidar otras fuentes de carbono <sup>(15)</sup>.

### ***Massilia***

Son Gram negativas, en forma de bastoncillo <sup>(50)</sup>, que pertenecen a la familia Oxalobacteraceae (Betaproteobacteria) y comprende a las especies *Massilia timonae*, *Massilia dura*, *Massilia albidiflava*, *Massilia plicata* y *Massilia lutea* <sup>(51)</sup>. En un estudio reciente se demostró que *Massilia* sp., es altamente eficiente en la degradación fenantreno <sup>(52)</sup>. Lo anterior coincide, con un estudio en el que aislaron en muestras de suelo cepas degradadoras de fenantreno <sup>(53)</sup>.

### ***Neptunomonas***

Son bacterias marinas anaerobias facultativas, en forma de bacilos y Gram negativas, que biodegradan hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Las especies más representativas son *N. naphthovorans* y *N. japonica*. La primera usa naftaleno o 2-metilnaftaleno y fenantreno, como única fuente de carbono y electrones para su crecimiento aeróbico <sup>(18)</sup>. Este microorganismo puede biodegradar naftaleno y acenafteno <sup>(37)</sup>, también pueden oxidar otras fuentes de carbono <sup>(15)</sup>.

### ***Oleiphilus***

*Oleiphilus* (microorganismo amante del aceite). Son bacilos Gram negativos, móviles, gruesos aeróbicos que generalmente tienen  $0 \pm 7-1 \pm 4 \mu\text{m}$  de ancho y  $1 \pm 5-2 \pm 0 \mu\text{m}$  de largo cuando crecen en un medio suplementado con n-hexadecano. Son oxidasa y catalasa positivas. Solo los hidrocarburos alifáticos y sus derivados se utilizan como fuentes de carbono para su crecimiento. La especie representativa de este género es *Oleiphilus messinensis* <sup>(54)</sup>. Las especies de este género son reconocidas como bacterias hidrocarbonoclasticas profesionales, ya que siempre usan hidrocarburos como fuente prioritaria de carbono <sup>(21)</sup>. Estas bacterias pueden degradar alifáticos, alcoholes y alcanos <sup>(15)</sup>.

### ***Oleispira***

Son microorganismos en forma de espiral que degrada aceite, Gram negativas, de 2,0 - 5,0  $\mu\text{m}$  de largo por 0,4 - 0,8  $\mu\text{m}$  de ancho, móviles por un flagelo ( $> 5 \mu\text{m}$ ), quimioheterótrofas, aerobias, psicrófilas, capaces de crecer en condiciones anaeróbicas por reducción de nitrato. La oxidasa y la catalasa positiva, utilizan hidrocarburos alifáticos como única fuente de carbono y energía. Este género incluye las especies reconocidas como bacterias hidrocarbonoclasticas profesionales, ya que siempre usan hidrocarburos como fuente prioritaria de carbono <sup>(21)</sup> capaces de degradar alifáticos, alcoholes y alcanos <sup>(15)</sup>. La especie representativa es *Oleispira antarctica* <sup>(55)</sup>.

### ***Paraburkholderia***

Son bacilos Gram negativos, rectas, ligeramente curvado o, a veces, cocoides, con uno o más flagelos polares; el tamaño de las células varía, oscilando entre 0.4 y 1.2  $\mu\text{m}$  de ancho y 1,2–3,0  $\mu\text{m}$  de largo; los miembros del género *Paraburkholderia* han sido aislados de diversos nichos ecológicos como el suelo, la rizósfera, plantas, sedimento marino rico en arsénico, suelo contaminado y una superficie de roca erosionada <sup>(56)</sup>. *Paraburkholderia*, puede degradar naftaleno, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) e hidrocarburos alifáticos, la especie más representativa es *Paraburkholderia aromaticivorans*, la cual biodegrada naftaleno y benceno, tolueno, etilbenceno y xileno <sup>(27)</sup>.

### ***Phaeobacter***

Son bacterias móviles Gram negativas, obligatoriamente aerobias, quimioheterotróficas, ovoides o en forma de bastón, pueden ser psicrófilas, móviles, de 0,3–0,5  $\mu\text{m}$   $\times$  1,0–2,6  $\mu\text{m}$  de tamaño <sup>(57)</sup>. Una investigación reciente, describió, que los hidrocarburos aromáticos policíclicos se degradan rápidamente durante los primeros 30 días de incubación en presencia de un consorcio bacteriano, entre ellas estaban presentes *Phaeobacter* spp., este género de bacteria puede degradar hidrocarburos policíclicos <sup>(24)</sup>.

### ***Pseudoalteromonas***

Es un género de gammaproteobacterias que se encuentra comúnmente en diversos ambientes marinos; sus especies poseen características importantes que han despertado un interés creciente por parte de los investigadores en las ciencias ecológicas y farmacéuticas <sup>(58)</sup>.

Son bacterias marinas, Gram negativas, estrictamente aeróbicas, en forma de bastón, móviles por un flagelo polar único y tienen un metabolismo quimioheterotrófico <sup>(59)</sup>. En el derrame de petróleo Deepwater Horizon (Horizonte Profundo), sucedido en el 2010, se encontró un consorcio bacteriano que degradó el hidrocarburo, uno de estos géneros presentes fue *Pseudoalteromonas* que puede degradar fenantreno y criseno <sup>(15)</sup>. La especie identificada que logra biodegradar hidrocarburos fue *Pseudoalteromonas tetraodonis* <sup>(60)</sup>. En una investigación, se aislaron 251 cepas de las que se lograron identificar 124 correspondientes a 24 géneros y 40 especies; la más frecuente fue *Pseudoalteromonas* <sup>(61)</sup>.

### ***Pseudomonas***

Son bacterias exclusivamente quimiorganótrofos que realizan metabolismo respiratorio, aerobias, bacilo Gram negativo y con flagelo polar, puede usar varias fuentes de carbono para obtener energía, normalmente son oxidasa y catalasa positivas <sup>(14)</sup>. En un estudio reciente, se demostró que una cepa de *Pseudomonas*, todavía tiene la capacidad de biodegradar hidrocarburo tipo n-hexano; la especie más representativa es la *Pseudomonas aeruginosa* <sup>(62)</sup>, de igual forma este género de bacteria también logró degradar el n – hexadecano, en este estudio la especie estudiada fue *Pseudomonas synxantha* <sup>(63)</sup>. Este microorganismo que produce los BS

tipo ramnolípidos, lipopolisacáridos, viscosin <sup>(8)</sup>, surfactantes particulados y biosur PM <sup>(35)</sup>, puede biodegradar naftaleno, fluoreno, acenafeno, fenantreno, fluoranteno, criseno, benzo( $\alpha$ )antraceno <sup>(37)</sup> y hexano <sup>(41)</sup>. *Pseudomonas aeruginosa* posee una variación metabólica y una producción enzimática que les permite adaptarse a ambientes contaminados con hidrocarburos <sup>(64)</sup>.

## 7 Técnica de degradación que utiliza microorganismos

La biorremediación es una tecnología prometedora para el tratamiento de sitios contaminados, ya que es de bajo costo, lleva a la completa mineralización del sustrato y no requiere técnicas sofisticadas para su funcionamiento; los subproductos son principalmente agua, CO<sub>2</sub> y biomasa celular; las técnicas de biorremediación están basadas en la habilidad de algunos organismos (bacterias, algas, hongos, nematodos y plantas) de consumir hidrocarburos como fuente de energía y carbono <sup>(9)</sup>. Básicamente la biorremediación permite acelerar los procesos biodegradativos que de forma natural ocurren en los ecosistemas contaminados <sup>(8)</sup>.

Existen principalmente dos formas de llevar adelante una estrategia de biorremediación: *in situ* y *ex situ* <sup>(11)</sup>.

- La primera incluye las técnicas del bioventeo, la bioaumentación, la bioestimulación, la biolabranza, la atenuación natural y fitorremediación <sup>(65)</sup>.

Bioventeo: es una técnica innovadora *in situ* donde los microorganismos autóctonos son estimulados mediante la inyección de aire, con el objetivo de proporcionar oxígeno para estimular el crecimiento microbiano y la actividad de los microorganismos para promover la degradación de los hidrocarburos del petróleo <sup>(66)</sup>. Aquí no incluyen a microorganismos extranjeros, solo ayudan al crecimiento de microorganismos nativos.

Bioaumentación: consiste en la adición de microorganismos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante <sup>(67)</sup>. Aquí utilizan microbios tanto autóctonos como alóctonos, pero que tengan la capacidad de biodegradar el contaminante.

Bioestimulación: esta técnica implica la estimulación de los microorganismos autóctonos, mediante la adición de nutrientes o receptores de electrones, para mejorar la biodegradación de los contaminantes orgánicos <sup>(68)</sup>. Se utiliza microorganismos indígenas, pero adicionándole nutrientes para facilitarle el crecimiento. La única fuente de carbono es el contaminante.

Biolabranza: consiste en que el suelo contaminado es tratado *in situ* por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación, optimizando la velocidad de degradación <sup>(65)</sup>. De manera directa no utilizan microorganismos, pero de manera inherente en el suelo se encuentran los consorcios microbianos que facilitan la biorremediación.

Atenuación natural: proceso natural por el cual los microorganismos descomponen o degradan sustancias peligrosas, transformándolas en sustancias menos tóxicas o inocuas <sup>(69)</sup>. Este proceso es lento, permite que la biodegradación se de manera natural, no se le agrega ningún nutriente ni microorganismos.

Fitorremediación: utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatizar o estabilizar contaminantes<sup>(70)</sup>. No se utilizan directamente los microorganismos.

- Las técnicas de biorremediación *ex situ*, se lleva a cabo fuera del sitio de contaminación, estas técnicas implican la extracción o remoción de suelo contaminado del lugar de origen<sup>(71)</sup>.

“Landfarming”: es una técnica en la que el suelo se excava y extiende, es labrada periódicamente, el objetivo es estimular los microorganismos nativos para facilitar la degradación de los contaminantes<sup>(72)</sup>.

Composteo: el composteo es un proceso biológico que consiste en la combinación de tierra contaminada con material orgánico biodegradable como el estiércol o desechos agrícolas, la presencia de estos materiales orgánicos estimulan el desarrollo de la población microbiana; el compostaje se puede realizar usando pilas estáticas aireadas<sup>(73)</sup>.

Biopilas: es una combinación entre “landfarming” y compostaje; consiste en formar pilas con el suelo contaminado; el sistema puede ser abierto o cerrado, se adiciona con nutrientes y agua y se coloca en áreas de tratamiento que incluyen sistemas para colectar lixiviados y alguna forma de aireación; las biopilas proporciona un entorno favorable para las comunidades indígenas<sup>(65)</sup>.

Biorreactores: este método se utiliza para tratar material sólido contaminado (suelos, lodos y sedimentos) o agua a través de un biorreactor; un biorreactor puede ser definido como un recipiente de contención (sólido, líquido y gas) que mezcla el contenido para aumentar la tasa de degradación por medio de los microorganismos<sup>(72)</sup>.

La biodegradación es el proceso de la digestión, asimilación, y metabolización de un compuesto orgánico, llevado a cabo por microorganismos; este proceso incluye las siguientes reacciones: oxidoreducción, procesos de adsorción e intercambio de iones, y reacciones de quelación de formación de complejos que dan lugar a la fijación de metales<sup>(75)</sup>. La biodegradación puede complementarse con otras tecnologías que pueden en determinadas situaciones aumentar su eficiencia, hay autores que han trabajado con mezclas de microorganismo a fin de optimizar la degradación<sup>(7)</sup>. Sin embargo, debido a la complejidad de la composición del hidrocarburo, la biodegradación por parte de las bacterias dependerá de las proporciones que tenga de cada una de sus fracciones<sup>(3)</sup>.

Las bacterias en la biodegradación y/o biorremediación de hidrocarburos, estos pueden biodegradar los hidrocarburos tanto por la vía anaeróbica como aeróbica. Si utiliza la vía anóxica en los hidrocarburos, utilizan el fumarato como sustrato, presentando una reacción de tipo de oxidación; en cuanto a la vía aeróbica, tanto los hidrocarburos alifáticos como los aromáticos, utilizan unas enzimas llamadas oxigenasas, que pueden ser monoxigenas y dioxigenasas, dando como resultado acetyl-CoA, el cual se va a integrar en el ciclo de Krebs, en los aromáticos de igual manera produce además de acetyl-CoA, succinato y piruvato los cuales entran en el ciclo del ácido cítrico<sup>(14)</sup>.

## 8 Conclusiones

Se han reportado varias especies de bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos, *Alcanivorax* spp., *Cycloclasticus* spp., *Neptunomonas* spp., *Oleiphilus* spp. y *Oleispira* spp. se han especializado en biodegradar hidrocarburos a diferencia de patógenas oportunistas, que han logrado adaptarse a ambientes contaminados con compuestos químicos derivados del petróleo entre las que se encuentran *Pseudomonas* spp., *Klebsiella* spp., *Enterobacter* spp., entre otras.

En la literatura consultada se reportaron algunos biosurfactantes sintetizados por géneros bacterianos. Entre estas el género *Pseudomonas*, es un grupo, que se encuentra en la mayoría de los ambientes contaminados por hidrocarburos.

Para las bacterias, la vía aerobia en la biodegradación es más rentable que la anaerobia, ya que generan más energía y pueden utilizarlas para sus procesos bioquímicos.

Se revisaron las técnicas de biodegradación utilizadas. Sin embargo, estas técnicas utilizan a los microorganismos de diferentes maneras, por ejemplo, el bioventeo utiliza los microorganismos nativos en el lugar contaminado. En la bioaumentación utilizan microorganismos específicos que logran biodegradar un compuesto químico específico (contaminante). En la biolabranza utilizan el mismo suelo, pero con diferentes nutrientes, que favorecen el crecimiento de diferentes microorganismos. En la atenuación natural, los microorganismos para biodegradar parcialmente el contaminante. En la fitorremediación utilizan a las plantas, pero indirectamente a los microorganismos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por su apoyo logístico.

## Referencias bibliográficas

1. Narváez-Flórez S., Gómez M.L, Martínez M.M. (2008). Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aislados a partir de sedimentos del Caribe colombiano. *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, 37(1): 61-75. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-97612008000100004&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-97612008000100004&lng=en&tlng=es)
2. Serrano Guzmán M.F., Torrado Gómez L.M. y Pérez Ruiz D.D. (2013). Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *Revista Científica General José María Córdova*, 11: 233-244. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1900-65862013000200012&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-65862013000200012&lng=en&tlng=es)
3. Acuña A., Pucci G., Morales M.J. y Pucci O. (2010). Biodegradación de petróleo y sus derivados por la comunidad bacteriana en un suelo de la Patagonia - Argentina. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 30(1): 29-36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=199416355007>

4. Cavazos-Arroyo J., Pérez-Armendáriz B. y Mauricio-Gutiérrez A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 11(4): 539-50. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-54722014000400006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722014000400006&lng=es&tlng=es)
5. Moñino Aguilera N. y Galdos Balzategui A. (2008). Exposición a la contaminación por actividad petrolera y estado de salud de la comuna Yamanunka (Sucumbíos, Ecuador). <https://hdl.handle.net/2072/5273>
6. Castellanos-Rozo J., López J.G., Mendivelso A.C. (2016). Biodegradación de carbofuran y carbaril por *Sphingomonas* sp., S8-M3-13. *Agronomía & Ambiente*, 36(1): 45-52. <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/51>
7. Pucci G, Acuña A, Pucci O. (2015). Biodegradación de hidrocarburos en fondos de tanques de la industria petrolera. *Revista Peruana de Biología*, 22: 97-101. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-99332015000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332015000100006&lng=es&tlng=es).
8. Aguilar Sagástegui L.D. (2013). Aislamiento de microorganismos productores de biosurfactantes. *Scientia Agropecuaria*, 7(1), 23-31. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>
9. Mayz J. y Manzi L. (2017). Bacterias hidrocarburoclásticas del género *Pseudomonas* en la rizosfera de *Samanea saman* (Jacq.) Merr. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XIX(1): 29-37. DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.57408.
10. Gallegos Rangel M.E., Madera-Sandoval R.L., Castro-Escarpulli G., Nájera-Martínez M., Domínguez-López M.L., García-Latorre E.A., *et al.* (2018). Toxicokinetic and toxicodynamic symbiotic interactions among intestinal *Pseudomonas* degrading of hydrocarbons with its wild host fish *Chirostoma jordani*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(4): 15. DOI: 10.20937/rica.2018.34.04.15.
11. Loureiro D.B., Olivera C., Salvatierra L.M. y Perez L.M. Evaluación del potencial de biodegradación de diésel empleando bacterias aisladas de lodos industriales. *Energeia* 15 (5): 84-89. <http://hdl.handle.net/11336/103513>
12. Vera-Baceta M-A., Thelwall M. y Kousha K. (2019). Web of Science and Scopus language coverage. *Scientometrics*, 121(3): 1803-1813. DOI: 10.1007/s11192-019-03264-z
13. Madigan M., Martinko J., Dunlap P. y Clark D. (2009). Brock. Biología de los microorganismos (Duodécima ed.). Editorial PEARSON. España.
14. Madigan M., Martinko J., Bender K., Buckley D. y Stahl D. (2015). Brock. Biología de los microorganismos. MarXn-Romo M, editor. Pearson Educación SA. España.

15. Ospina M.C., Jaramillo G.E.E. y Paba G.M. (2010). Aislamiento de bacterias potencialmente degradadoras de petróleo en hábitats de ecosistemas costeros en la Bahía de Cartagena, Colombia. *Nova*, 8(13): 76-86. DOI: 10.22490/24629448.441
16. Jiménez Hernández V. y Guerra Sánchez R. (2016). Obtención de un medio enriquecido para hacer más eficiente la biodisponibilidad de los hidrocarburos intemperizados en un suelo costero. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32: 413-24. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.04.05.
17. Mendo Pascual W.L. Alternativa de biorremediación con bacterias autóctonas de sedimento contaminado de la Laguna de Tamiahua, Veracruz, México. 2014. <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/41954>
18. Pérez Silva R.M., Camacho Pozo M.I., Gómez Montes de Oca J.M., Ábalos Rodríguez A., Viñas M. y 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: 44-51. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181214889004>
19. Baztan M.S., Pucci O.H. y Pucci G.N. (2015). Electro biorremediación de un suelo con una contaminación antigua de hidrocarburo. *Acta Biológica Colombiana*, 20(2): 145-152. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v20n2.45257>
20. Quintana Saavedra D.M., Cabrera M., Tous Herazo G. y Echeverry G. (2012). Aislamiento de microorganismos oligotróficos degradadores de hidrocarburos en la Bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 30: 03-12. DOI: 10.26640/01200542.30.3\_12
21. Wang H., Wang B., Dong W. y Hu X. (2016). Co-acclimation of bacterial communities under stresses of hydrocarbons with different structures. *Scientific Reports*, 6(1): 34588. DOI: 10.1038/srep34588
22. Liu J., Techtmann S.M., Woo H.L., Ning D., Fortney J.L. y Hazen T.C. (2017). Rapid response of Eastern Mediterranean Deep Sea microbial communities to oil. *Scientific Reports*, 7(1): 5762. DOI: 10.1038/s41598-017-05958-x
23. Quiliche-Duran J.P.J., Cortez Lázaro A.A., Rodríguez Grados P.M., Silva Vergara M.Z. y Huayna Dueñas L.A. (2016). Aislamiento e identificación de *Pseudomonas aeruginosa* potencialmente degradadoras de crudo de petróleo, provenientes de suelos en talleres de automóviles en el Norte Chico. *Infinitum*, 6(1). DOI: 10.51431/infinitum.v6i1.10
24. Bacosa H.P., Erdner D.L., Rosenheim B.E., Shetty P., Seitz K.W., Baker B.J., et al. (2018). Hydrocarbon degradation and response of seafloor sediment bacterial community in the northern Gulf of Mexico to light Louisiana sweet crude oil. *The ISME Journal*, 12(10): 2532-2543. DOI: 10.1038/s41396-018-0190-1
25. Nisperuza Vidal A.K. y Montiel Aroca M. (2018). Caracterización y evaluación de cepas bacterianas nativas con capacidad hidrocarburofítica del pozo petrolero de San Sebastián, Lórica, Departamento de Córdoba: Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/969>

26. Ortiz-Maya J., Escalante-Espinosa E., Fócil-Monterrubio R.L., Ramírez-Saad H.C. y Díaz Ramírez I.J. (2017). Dinámica de poblaciones bacterianas y actividad deshidrogenasa durante la biorremediación de suelo recién contaminado e intemperizado con hidrocarburos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33: 237-246. DOI: 10.20937/rica.2017.33.02.05
27. Lee Y., Lee Y., Jeon CO. (2019). Biodegradation of naphthalene, BTEX, and aliphatic hydrocarbons by *Paraburkholderia aromaticivorans* BN5 isolated from petroleum-contaminated soil. *Scientific Reports*, 9(1): 860. DOI: 10.1038/s41598-018-36165-x
28. Liu Y-F., Qi Z-Z., Shou L-B., Liu J-F., Yang S-Z., Gu J-D., et al. (2019). Anaerobic hydrocarbon degradation in candidate phylum 'Atribacteria' (JS1) inferred from genomics. *The ISME Journal*, 13(9): 2377-2390. DOI: 10.1038/s41396-019-0448-2
29. Cui K., Zhang Z., Zhang Z., Sun S., Li H., Fu P. (2019). Stimulation of indigenous microbes by optimizing the water cut in low permeability reservoirs for green and enhanced oil recovery. *Scientific Reports*, 9(1): 15772. DOI: 10.1038/s41598-019-52330-2
30. García-Cruz N.U. y Aguirre-Macedo M.L. (2014). Biodegradación de petróleo por bacterias: algunos casos de estudio en el Golfo de México. En: *Golfo de México: Contaminación e Impacto Ambiental, Diagnóstico y Tendencias*. Botello, AV, Rendón von Osten J., Benítez J.A., Gold-Bouchot G, Eds. 641-652. ISBN 978-607-7887-71-3
31. Liporace F., Conde Molina D., Giulietti A.M., Quevedo C. (2018). Optimización de bioprocesos integrados a partir de cepas aisladas de áreas crónicamente contaminadas con hidrocarburos para la obtención de biosurfactantes. *Revista Tecnología y Ciencia*, (30): 231-241. <https://190.114.222.115/index.php/rtyc/article/view/160>
32. Jiménez Islas D., Medina Moreno S.A., Gracida Rodríguez J.N. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos: una revisión. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 26: 65-84. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992010000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100006&lng=es&tlng=es)
33. Burgos Díaz C. (2012). Biotensoactivos producidos por "*Sphingobacterium detergens*" sp. nov.: Producción, caracterización y propiedades: Universitat de Barcelona. <https://www.tdx.cat/handle/10803/96091#page=1>
34. Riojas González H., Torres Bustillos L., Mondaca Fernández I., Balderas Cortes J. y Gortáres Moroyoqui P. (2010). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Química Viva*, 9: 120-145. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86315692003>
35. Raiger Iustman LJ, López NI. (2009). Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Química Viva*, 8(3):146-161. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/84389>
36. Nápoles-Álvarez J., Bahín-Deroncelé L., Gutiérrez-Rojas M., Toro-Álvarez D. D., Abalos-Rodríguez A. 2019. Degradación de diesel en agua de mar utilizando un consorcio bacteriano. *Tecnología Química*, 39(2). <https://www.redalyc.org/journal/4455/445559634011/html/>

37. Castro Gutiérrez V.M. (2009). Determinación de la capacidad biodegradativa de hidrocarburos de distintas poblaciones bacterianas presentes en un acuífero contaminado con combustibles en Moín, Limón. <http://hdl.handle.net/10669/73294>
38. Frías-Salcedo J.A. (2017). The genus *Aeromonas* as a pathogen for humans. *Revista de Sanidad Militar*, 58(4): 321-323.
39. Lopardo H.Á. (2016). Introducción a la microbiología clínica. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata - Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52389>
40. Kaczorek E., Bielicka-Daszkiwicz K., Héberger K., Kemény S., Olszanowski A. y Voelkel A. (2014). Best conditions for biodegradation of diesel oil by chemometric tools. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(1): 117-126. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-709461>
41. Carrasco Cabrera D.G. (2007). Aislamiento e identificación de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos, comprobando su actividad enzimática: Quito: USFQ. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/569>
42. Largo Pereda E. (2011). Degradación de alcanos mediante *Alcanivorax venutensis* inmovilizada en hidrogeles adhesivos y biodegradables. <http://hdl.handle.net/10810/12269>
43. Caizapanta Saltos D.A. (2018). Optimización de las condiciones de operación para la producción de biosurfactantes utilizando una bacteria del género *Stenotrophomonas*. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8980>
44. Herrera M.L., Catarinella G., Mora D., Obando C. y Moya T. (2005). *Chromobacterium violaceum* sensibilidad antimicrobiana. *Revista Médica del Hospital Nacional de Niños Dr Carlos Sáenz Herrera*, 40: 05-08. [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1017-85462005000100001&lng=en](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1017-85462005000100001&lng=en).
45. Hernández A.L.D., Escalante S.A. y Escobar G.A.B, editors. (2014). Identificación de *Citrobacter koseri* como nuevo patógeno en pacientes con rinitis crónica. *Anales de Otorrinolaringología Mexicana*, 59(1). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=48326>
46. Moreno Ayala L.V. (2017). Caracterización de cepas bacterianas de la laguna amarilla perteneciente al nevado El Altar en la provincia de Chimborazo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7877>
47. Kasai Y., Kishira H. y Harayama S. (2002). Bacteria belonging to the genus *Cycloclasticus* play a primary role in the degradation of aromatic hydrocarbons released in a marine environment. *Applied and environmental microbiology*, 68(11): 5625-5633. DOI:10.1128/AEM.68.11.5625-5633.2002
48. Nava-Centeno A.R., Ronquillo-González A., Cabrera-Ceja A.J., Silva-Bautista D., Pérez-Cruz K.A. y García-González C.A. (2019). *Klebsiella oxytoca*: el futuro de la biorremediación. *Revista Materia, Ciencia y Nanociencia*, 2(1): 9-14. <https://www.uv.mx/veracruz/microna/files/2019/07/ART02.pdf>

49. Ng H.J., López-Pérez M., Webb H.K., Gomez D., Sawabe T., Ryan J., *et al.* (2014). *Marinobacter salarius* sp. nov. and *Marinobacter similis* sp. nov., isolated from sea water. *PLOS ONE*, 9(9): e106514. DOI: 10.1371/journal.pone.0106514
50. Park M.K. y Shin H.B. (2013). *Massilia* sp. isolated from otitis media. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 77: 303-305. DOI: 10.1016/j.ijporl.2012.11.011
51. Gallego V., Sánchez-Porro C., García M.T. y Ventosa A. (2006). *Massilia aurea* sp. nov., isolated from drinking water. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 56(10): 2449-2453. DOI: 10.1099/ijs.0.64389-0
52. Gu H., Yan K., You Q., Chen Y., Pan Y., Wang H., *et al.* (2021). Soil indigenous microorganisms weaken the synergy of *Massilia* sp. WF1 and *Phanerochaete chrysosporium* in phenanthrene biodegradation. *Science of the Total Environment*, 781: 146655. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146655
53. Bodour A.A., Wang J-M., Brusseau M.L. y Maier R.M. (2003). Temporal change in culturable phenanthrene degraders in response to long-term exposure to phenanthrene in a soil column system. *Environmental Microbiology*, 5(10): 888-895. DOI: 10.1046/j.1462-2920.2003.00481.x
54. Golyshin P.N., Chernikova T.N., Abraham W-R., Lünsdorf H., Timmis K.N. y Yakimov M.M. (2002). Oleiphilaceae fam. nov., to include *Oleiphilus messinensis* gen. nov., sp. nov., a novel marine bacterium that obligately utilizes hydrocarbons. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52(3): 901-911. DOI: 10.1099/00207713-52-3-901
55. Yakimov M.M., Giuliano L., Gentile G., Crisafi E., Chernikova T.N., Abraham W.R., *et al.* (2003). *Oleispira antarctica* gen. nov., sp. nov., a novel hydrocarbonoclastic marine bacterium isolated from Antarctic coastal sea water. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53, 779-185. DOI: 10.1099/ijs.0.02366-0
56. Lee Y. y Jeon C.O. (2018). *Paraburkholderia aromaticivorans* sp. nov., an aromatic hydrocarbon-degrading bacterium, isolated from gasoline-contaminated soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 68(4):1251-7. DOI: 10.1099/ijsem.0.002661
57. Zhang D-C., Li H-R., Xin Y-H., Liu H-C., Chi Z-M., Zhou P-J., *et al.* (2008). *Phaeobacter arcticus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from the Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(6):1384-1387. DOI: 10.1099/ijs.0.65708-0
58. Zeng Z., Guo X-P., Cai X., Wang P., Li B., Yang J-L., *et al.* (2017). Pyomelanin from *Pseudoalteromonas lipolytica* reduces biofouling. *Microbial biotechnology*, 10(6):1718-1731. DOI:10.1111/1751-7915.12773

59. Xu X-W., Wu Y-H., Wang C-S., Gao X-H., Wang X-G. y Wu M. (2010). *Pseudoalteromonas lipolytica* sp. nov., isolated from the Yangtze River estuary. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 60(9): 2176-2181. DOI: 10.1099/ijs.0.017673-0
60. Gutiérrez T., Singleton D.R., Berry D., Yang T., Aitken M.D. y Teske A. (2013). Hydrocarbon-degrading bacteria enriched by the Deepwater Horizon oil spill identified by cultivation and DNA-SIP. *The ISME Journal*, 7(11): 2091-2104. DOI: 10.1038/ismej.2013.98
61. Pucci G.N., Acuña A., Tonin N., Tiedemann M.C. y Pucci O.H. (2010). Diversidad de bacterias cultivables con capacidad de degradar hidrocarburos de la playa de Caleta Córdova, Argentina. *Revista Peruana de Biología*, 17: 237-244. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-99332010000200015&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332010000200015&lng=es&tlng=es).
62. He S., Ni Y., Lu L., Chai Q., Liu H. y Yang C. (2019). Enhanced biodegradation of n-hexane by *Pseudomonas* sp. strain NEE2. *Scientific Reports*. 9(1):16615. DOI: 10.1038/s41598-019-52661-0
63. Meng L., Li H., Bao M. y Sun P. (2017). Metabolic pathway for a new strain *Pseudomonas synxantha* LSH-7': from chemotaxis to uptake of n-hexadecane. *Scientific Reports*, 7(1): 39068. DOI: 10.1038/srep39068
64. Rache-Arce D.C., Machacado-Salas M. y Rosero-García D. 2022. Hydrocarbon-degrading bacteria in Colombia: systematic review. *Biodegradation*, 33(2): 99-116. DOI: 10.1007/s10532-022-09976-z
65. Volke T. y Velasco J. (2003). Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental INE-SEMARNAT.
66. Eyvazi M.J. y Zytner R.G. (2009). A correlation to estimate the bioventing degradation rate constant. *Bioremediation Journal*, 13(3): 141-153. DOI: 10.1080/10889860903127035
67. Mahanty B., Kim S. y Kim C.G. (2013). Assessment of a biostimulated or bioaugmented calcification system with *Bacillus pasteurii* in a simulated soil environment. *Microbial Ecology*, 65(3): 679-688. DOI: 10.1007/s00248-012-0137-4
68. Singh A., Parmar N., Kuhad R.C. y Ward O.P. 2011. Bioaugmentation, biostimulation, and biocontrol in soil biology. In: Singh A, Parmar N, Kuhad RC, editors. *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-19769-7\_1
69. Margesin R. y Schinner F. (2001). Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7): 3127-3133. DOI: 10.1128/AEM.67.7.3127-3133.2001

70. Harvey P.J., Campanella B.f. Fau - Castro P.M.L., Castro Pm Fau - Harms H, Harms H Fau - Lichtfouse E., Lichtfouse E. Fau - Schäffner A.R., Schäffner Ar Fau - Smrcek S., *et al.* (2002). Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols. *Environmental Science and Pollution Research*, 9, 29–47. <https://doi.org/10.1007/BF02987315>
71. Sardrood B.P., Goltapeh E.M. y Varma A. (2013). An introduction to bioremediation. In: Goltapeh E.M., Danesh Y.R., Varma A., editors. *Fungi as bioremediators*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-33811-3\_1
72. Vidali M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7): 1163-1172. DOI: 10.1351/pac200173071163
73. Antizar-Ladislao B., Spanova K., Beck A.J. y Russell N.J. (2008). Microbial community structure changes during bioremediation of PAHs in an aged coal-tar contaminated soil by in-vessel composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61(4): 357-364. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.10.002
74. Ibarra E.D.W. y Redondo M.J.M. Modelo para biorremediación de suelos contaminados. Una aproximación con dinámica de sistemas. Modelo de biorremediación de suelos contaminados. Un enfoque de dinámica de sistemas. En: “*La simulación al servicio de la academia-reflexiones y aplicaciones de la dinámica de sistemas en Colombia 2011*”, Memorias del 9 encuentro colombiano de dinámica de sistemas ISSN 2027-77092011. <http://repository.urosario.edu.co/handle/10336/2862>

### **Dirección de los autores**

Roger Alberto Rabelo Florez

Docente Ocasional

Escuela Ciencias de la Salud, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

[roger.rabelo@unad.edu.co](mailto:roger.rabelo@unad.edu.co)

Marco Antonio Márquez Gómez

Docente Ocasional

Escuela Ciencias de la Salud, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

[marco.marquez@unad.edu.co](mailto:marco.marquez@unad.edu.co)