

Uso de consorcios microbianos en la biorremediación marina: una revisión

Calderón-Pazos, Ana Paola ¹□, Ortega Ferron, Pablo ¹□,
Castillo Carvajal Laura Catalina ²*

¹ Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Anáhuac México campus Norte

² Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Anáhuac México campus Norte

□Estos autores contribuyeron de igual forma a esta investigación.

*Autor de correspondencia

laura.castillo@anahuac.mx

Resumen

Los ambientes marinos están expuestos a contaminantes provenientes de múltiples fuentes, principalmente antropogénicas. Estas son una amenaza para la biodiversidad, la calidad del agua, productividad y la supervivencia de los ecosistemas marinos. La biorremediación surge como respuesta viable para la eliminación de los contaminantes gracias a su compatibilidad ecológica y rentabilidad, se trata de una tecnología emergente que utiliza organismos vivos para eliminar contaminantes. El objetivo de la revisión es recopilar la información actual sobre las estrategias en uso para la limpieza de los mares, además de observar los consorcios microbianos empleados y proponer uno basado en las revisiones teóricas. La biorremediación marina ha sido una técnica exitosa y muy utilizada en la limpieza de los océanos, debido a su compatibilidad con los ciclos biogeoquímicos, haciéndola una tecnología amigable y sustentable. Las estrategias más utilizadas en biorremediación marina son aquellas basadas en el aprovechamiento de microorganismos degradadores. Entre los microorganismos más utilizados, por su actividad y eficiencia, están las bacterias, de los géneros *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.*, por su actividad degradadora frente a distintos compuestos. Los consorcios microbianos juegan un papel importante y funcionan como estrategia viable debido a que la diversidad metabólica en éstos ayuda a la eliminación de varios contaminantes al mismo tiempo. La biorremediación marina requiere de cooperación y abordajes de distintos puntos de vista ya que las herramientas disponibles son muchas, pero también lo son los contaminantes y daños.

Palabras clave: *biorremediación marina, consorcios microbianos, contaminación marina, biotecnología, consorcios bacterianos*

Abstract

Marine environments are exposed to pollutants from multiple sources, mainly anthropogenic. These are a threat to biodiversity, water quality, productivity, and the survival of marine ecosystems. Bioremediation emerges as a viable response to the elimination of contaminants, thanks to its ecological compatibility and profitability, it is an emerging technology that uses living organisms to eliminate pollutants. The objective of this review is to collect information on the strategies for cleaning the oceans, observe the microbial consortia used, and propose one based on the theoretical revisions. Marine bioremediation has been a successful and widely used technique in cleaning the oceans, due to its compatibility with biogeochemical cycles, making it a friendly and sustainable technology. The most used strategies in marine bioremediation are those based on the use of degrading microorganisms. Among the most used microorganisms, due to their activity and efficiency, are bacteria, mainly of the genus *Bacillus spp.* and *Pseudomonas spp.*, for their degrading activity against different compounds. Microbial consortia emerge as a viable strategy because their metabolic diversity in them helps eliminate several contaminants at the same time. Marine bioremediation requires cooperation and approaches from different points of view since the available tools are many, but so are the pollutants and damages.

Keywords: *marine bioremediation, microbial consortia, marine pollution, biotechnology, bacterial consortia*

Introducción

Los ambientes marinos están constantemente expuestos a contaminación proveniente de varias fuentes, como aguas residuales industriales y domésticas, escorrentía, combustión, etc., que afectan la biodiversidad, calidad del agua y la productividad de los ecosistemas marinos (Dell' Anno et al., 2021; Kumar & Prasannamedha, 2021). La principal herramienta utilizada para el manejo de la contaminación marina a lo largo de la historia han sido medidas regulatorias o legislativas para controlar la cantidad de contaminantes introducidos a este ecosistema. Sin embargo, en la actualidad se han tenido que aplicar tecnologías basadas en tratamientos físicos y químicos para la restauración de mares y océanos. La biorremediación surge como una alternativa viable para la eliminación de contaminantes en mares y océanos debido a su compatibilidad ecológica y rentabilidad económica (Frid & Caswell, 2017; Ławniczak et al., 2020). La biorremediación es una tecnología emergente que utiliza microorganismos, plantas o enzimas microbianas para eliminar contaminantes en el ambiente (Singh et al., 2019).

El objetivo de esta revisión es el de proporcionar información actual sobre las estrategias de biorremediación que se están utilizando en la limpieza de los mares. Además de revisar los consorcios microbianos que están siendo empleados en la actualidad.

Contaminación de mares y océanos

La definición de *contaminación marina* más aceptada en ambientes académicos y políticos fue dada por las Naciones Unidas en 1990 y es: "La introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o energía en el medio marino (incluidos los estuarios) que causan efectos perjudiciales tales como daños a los recursos vivos, peligros para la salud humana, obstáculo para las actividades marinas, incluida la pesca, el deterioro de la calidad del agua de mar y la reducción de los atractivos naturales" (GESAMP, 1990).

Una amplia variedad de actividades terrestres contribuyen a la descarga de contaminantes en el mar, ya sea directamente, o mediante el transporte por los ríos y la atmósfera (GESAMP, 1990). Las 5 vías principales de

entrada de los contaminantes son: (1) escorrentía, (2) entrada fluvial, (3) vertidos y descargas de barcos, (4) descargas directas de tuberías, y (5) deposiciones atmosféricas (Kennish, 2017). Los residuos antropogénicos más comunes en los ecosistemas marinos alrededor del mundo son materiales de dragado, aguas residuales, descargas industriales y municipales y plásticos. Estos residuos contienen una gran variedad de contaminantes entre los que destacan los metales pesados, hidrocarburos de petróleo, y otras sustancias, muchas de las cuales provienen de plásticos ya que de entre todos los contaminantes marinos los plásticos representan hasta el 80%. Hablando de los plásticos específicamente, estos vienen acompañados de compuestos químicos como el bisfenol-A y los bifenilos policlorados que se desprenden en grandes cantidades a medida que los plásticos se van convirtiendo en microplásticos. Esto provoca una contaminación de carácter químico y físico ya que estos microplásticos son consumidos por animales que posteriormente llegarán a los humanos, causando una toxicidad severa. Algunos estudios realizados por organizaciones como el grupo Dalberg Advisors y la organización independiente de conservación World Wild Fund for Nature, muestran que el plástico que se desarrolló hasta antes del año 2000 es idéntico al que se desarrolló hasta el 2016, la contaminación que podemos observar en los océanos, al igual que en el suelo y otras zonas acuíferas se debe al mal manejo de los residuos de este producto, lo que actualmente le aporta "características omnipresentes en la naturaleza", de acuerdo a los resultados de estas organizaciones (Kennish, 2017; Molina et al., 2021, Vinayaka KS & Kadkol S, 2022).

Biorremediación marina

La biorremediación marina ha surgido como una alternativa viable y eficiente para la restauración y restablecimiento de ecosistemas marinos (Dell' Anno et al., 2021). En la actualidad, esta técnica ha sido la más exitosa y preferida para la eliminación de contaminantes en océanos alrededor del mundo debido a su compatibilidad de la biorremediación con los ciclos biogeoquímicos lo que hace a esta tecnología sustentable y amigable con el ambiente.

Otras ventajas de estas estrategias son su adaptabilidad y bajo costo. La biorremediación marina se basa en el aprovechamiento de las capacidades metabólicas de células vivas o sus componentes biológicos para alcanzar la degradación de contaminantes orgánicos complejos en sus componentes más sencillos y menos tóxicos como dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos, etc. Existe un gran número de factores que afectan la efectividad de la biorremediación en estos ecosistemas, entre ellos encontramos la naturaleza y estructura del contaminante, solubilidad en el agua, biodisponibilidad, biodegradabilidad, concentración de metabolito y sustrato, oxígeno, salinidad, temperatura, pH, y la actividad de la población microbiana endémica (Paniagua, 2015).

Los microorganismos marinos son esenciales para la salud del medio ambiente y la del hombre. Ellos participan en ciclos biogeoquímicos, en las cadenas tróficas y, en general, en la degradación y producción de compuestos para el mantenimiento del equilibrio en el ecosistema. Éstos poseen una diversidad genética y bioquímica inmensa debido a las cambiantes condiciones ambientales que deben soportar en sus ecosistemas (Sivaperumal et al., 2017). Los ecosistemas marinos reciben una gran variedad de contaminantes por lo que la estrategia de biorremediación marina debe de ser la adecuada para lidiar con esta diversidad. Entre las estrategias más comunes para labiorremediación en mares se encuentran las enfocadas en el aprovechamiento de microorganismos degradadores, algunas de ellas son la adición de compuestos específicos para estimular la capacidad degradadora de microorganismos autóctonos (bioestimulación) y la adición de especies microbianas específicas con capacidad biodegradadora (bioaumentación) (Dell' Anno et al., 2021). Cuando se considera la aplicación de estrategias de bioaumentación para la degradación de hidrocarburos de petróleo, se ha observado que el uso de consorcios microbianos es más efectivo que el uso de una sola cepa, ya que diferentes grupos de bacterias pueden metabolizar diferentes grupos de hidrocarburos (Hosokawa et al., 2009; Varjani, 2017) y otros contaminantes mediante la

producción de enzimas degradadoras (Fuentes et al., 2014) y biosurfactantes (Souza et al., 2014). Un consorcio microbiano se define como “una asociación natural de dos o más poblaciones microbianas, de diferentes especies, que actúan conjuntamente como una comunidad en un sistema complejo, donde todos se benefician de las actividades de los demás” (Ochoa & Montoya, 2010). Las especies bacterianas más utilizadas para la degradación de contaminantes en mares y océanos pertenecen a los géneros *Alcaligenes spp.*, *Achromobacter spp.*, *Acinetobacter spp.*, *Alteromonas spp.*, *Arthrobacter spp.*, *Burkholderia spp.*, *Bacillus spp.*, *Enterobacter ssp.*, *Flavobacterium spp.* y *Pseudomonas spp.* (Ojuederie & Babalola, 2017; Xu et al., 2018).

Biorremediación de metales pesados

Los metales pesados son contaminantes persistentes en los ecosistemas marinos debido a su alta toxicidad. Metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cromo (Cr), zinc (Zn), níquel (Ni), cobre (Cu) y arsénico (As) son citotóxicos a bajas concentraciones, además de que se acumulan en sistemas biológicos ocasionando estrés oxidativo. Estos compuestos son de los contaminantes más difíciles de eliminar por su baja o nula biodegradabilidad (Ojuederie & Babalola, 2017). Algunos microorganismos son importantes en procesos de eliminación de metales pesados de los ecosistemas gracias a su capacidad de secuestrar, precipitar o cambiar el estado de oxidación de varios metales pesados (Ojuederie & Babalola, 2017). Ciertas especies bacterianas de los géneros *Bacillus spp.*, *Pseudomonas sp.*, *Sporosarcina spp.*, *Enterobacter sp.* y *Kocuria sp.*, hongos del género *Aspergillus spp.* y levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* han reportado eficiencias de remoción del 99% de As, 98.3% de Pb, 85.4% de Cd y 5.6% de Cu (Kang et al., 2016). Otras bacterias marinas se han propuesto para la biorremediación de metales pesados, siendo los principales organismos descomponedores de los océanos, tales como *Pseudomonas fluorescens*, *Dechloromonas aromatica*, *Alcanivorax borkumensis*, *Methylibium petroleiphilum*, *B. subtilis* y *Phanerochaete chrysosporium* (Husain et al., 2022). Otros microorganismos comúnmente utilizados en la biorremediación de metales pesados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Microorganismos usados comúnmente en la biorremediación de metales pesados.(Husain et al., 2022).

Tipo de microorganismo	Metal pesado removido
Bacterias	
<i>Kocuria flava</i>	Cu
<i>Sporosarcina ginsengisoli</i>	As
<i>Pseudomonas veronii</i>	Cd, Zn, Cu
<i>Pseudomonas putida</i>	Cr
<i>Enterobacter cloacae B2-DHA</i>	Cr
<i>Bacillus subtilis</i>	Cr
Hongos	
<i>Aspergillus versicolor</i>	Ni, Cu
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Pb
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	Cr
<i>Rhizopusoryzae</i>	Cr
Levaduras	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Pb, Cd

Biorremediación de desechos industriales orgánicos

Las actividades industriales son esenciales para el desarrollo económico de un país, además de ser una de las principales fuentes de contaminación de los ecosistemas marinos. Los desechos industriales son considerados como peligrosos para organismos vivos y el medio ambiente gracias a la elevada toxicidad de la gran variedad de contaminantes que contienen. Entre los contaminantes orgánicos más comunes encontramos colorantes, materia orgánica, pesticidas, entre otros. (Bharagava et al., 2020) En una primera instancia, el trabajo de Alves Licursi et al. (2021), en donde se desarrolló un consorcio efectivo para el tratamiento de Remazol Brilliant Blue R (RBBR) un colorante proveniente de la industria textil, principalmente para su detoxificación y decoloración. En el ensayo realizado se diseñó un consorcio compuesto por varias cepas específicas de microorganismos que demostraron tener una

efectividad del 52% en temas de detoxificación y hasta 86% en los ensayos de decoloración con concentraciones de hasta 500 ppm. Se comprobó un proceso de biosorción y por medio de análisis meta transcriptómicos se demostró que la decoloración y degradación subsecuente de RBBR se hizo a partir de una acción coordinada de oxidasas, oxigenasas e hidrolasas. El consorcio constaba de *Mucor racemosus* CBMAI 847, *Marasmiellus spp.* CBMAI 1062, *B. subtilis* CBMAI 707 y *Dietzia maris* CBMAI 705 (Alves Licursi et al., 2021). Otras actividades industriales relacionadas con la acuicultura también tienen un efecto considerable en cuanto a la calidad del agua y el bienestar de los ecosistemas. En este caso se observa particularmente al cultivo de camarón. Una importante actividad económica practicada desde el inicio de la década de los 60, ha enfrentado problemas relacionados con la alimentación excesiva, la sobreproducción y el constante aumento de la materia orgánica

producida por la excreta de los camarones. Además de esto el exceso de nitrógeno provoca un deterioro de la calidad de agua por la acumulación de amonio, nitritos y nitratos, los cuales tienen efectos tóxicos para la biota, lo que en torno acaba por afectar el pH, la concentración de oxígeno disuelto e incluso promueve la proliferación de microorganismos no deseados. Y es que los contaminantes provenientes de esta práctica vienen en varias formas, el alimento de los camarones, sus excretas, camarones muertos, amoniaco, urea, entre otros, los cuales acaban siendo vertidos en vías fluviales y eventualmente llegan al mar. Para corregir esto se realizó un estudio probando 4 consorcios microbianos, demostrando la versatilidad de estas herramientas, entre los microorganismos utilizados había bacterias tales como *B. subtilis*, *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus plantarum*, pero también se utilizó a *Saccharomyces cerevisiae*, al hongo *Trichoderma harzianum* y a algunas microalgas, que en realidad resultaron ser las más efectivas, estas fueron *Chlamydomonas sp.*, *Desmodesmus sp.*, y *Chlorella sp.* Este consorcio compuesto por microalgas autóctonas resultó tener un efecto muy bueno en la remediación del agua, llevando sus niveles a un punto donde incluso se podía reutilizar y se remediaba la mala calidad que esta suele tener por la actividad acuícola del cultivo de camarón (Navarrete et al., 2022).

Otro grupo importante de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales industriales son los pesticidas los cuales, en conjunto con otros tipos de químicos utilizados en la protección de cultivos, están compuestos por organofosfato, organoclorado, carbamato, piretroides, reguladores de crecimiento, neonicotinoides entre otros. El elevado uso de estos productos químicos sintéticos ha elevado su presencia en cuerpos de agua salados como mares y océanos debido a su persistencia y fácil migración desde su punto de origen para así contaminar suelos y otros ecosistemas de forma local y global (Carvalho, 2017). Para la eliminación de estos compuestos se ha propuesto la utilización de bacterias con capacidad degradadora de los ya mencionados compuestos químicos. Se ha demostrado que *Bacillus spp.*, *Pantoea agglomerans*, *Pseudomonas spp.* y *Serratia marcescens* tienen un metabolismo eficiente para la degradación de pesticidas organofosforados con reportes de un

55% de degradación por *Pseudomonas spp.*, 70% para *S. marcescens*, 73.5% en *Bacillus spp.* y *P. agglomerans* con 68.6% de degradación (alta concentración de clorpirifos) (Hernández et al., 2016; Morrillo, 2018; Piraban & Rincón, 2018).

Otras bacterias como *Pseudomonas putida*, *Acinetobacter spp.* y *Arthrobacter spp.* son eficientes para la degradación de Cyhalofop Buty presente en pesticidas, llegando a degradar hasta el 100% de este compuesto, comprobado por cromatografía líquida y espectrofotometría (Morrillo, 2018). Otro de los agentes bacterianos más descritos para la biorremediación de pesticidas son las actinobacterias, por lo que se han propuesto consorcios enteros de una sola especie, pero distintas cepas para el tratamiento de distintos compuestos químicos. Una propuesta en particular es el uso de *Streptomyces spp.* A2, A5, A11 y M7 para la degradación de lindano, clordano y metoxicloro, ya que demostraron tener extremadamente alta capacidad de degradación en el caso del clordano y el metoxicloro, degradando 99.8% y 99.5%, aunque para el lindano es bastante menor, con solo un 40.4% de remoción (Raimondo et al., 2017).

Biorremediación de hidrocarburos del petróleo
Los hidrocarburos del petróleo constituyen el principal grupo de contaminantes marinos. La creciente evidencia sobre su persistencia, toxicidad, mutagenicidad y carcinogenicidad enfatiza la necesidad de su remoción de ecosistemas marinos (Dash et al., 2012; Dell'Anno et al., 2021).

Estos son estructuras con 2 o más anillos de benceno adheridos en varias configuraciones estructurales (Lawal, 2017). Este contaminante proviene de una variedad de fuentes, son ampliamente utilizados en la industria agrícola, por lo que suelen estar en los alimentos, además de que son liberados de la quema de combustibles fósiles y de carbón (Lawal, 2017). Hay varios reportes que establecen la eficacia de las diferentes agrupaciones de microorganismos con la capacidad de degradar hidrocarburos de petróleo. Bacterias como *Sphingobium spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Klebsiella aerogenes*, *Sphingomonas spp.*, *Mycobacterium spp.*, *Terrabacter spp.*, *Rhodococcus spp.*, han presentado eficiencias de degradación de hasta el 90% (Chiriví et al., 2020; Lugo, 2017; Macchi,

2018) y por eso han sido utilizadas en distintos consorcios para degradar varios tipos de hidrocarburos de petróleo. *B. subtilis* ha mostrado potencial en la degradación de hidrocarburos de petróleo, principalmente n-alcanos de cadena larga (Gudiña et al., 2013; Tao et al., 2017). También se ha reportado la capacidad de esta especie de degradar compuestos aromáticos volátiles del petróleo como benceno, tolueno y xileno en un 82, 62 y 65% respectivamente, y eso es de manera natural, ya que también se observó que con nutrientes y peróxido de hidrógeno las eficiencias de degradación subían a 93, 72 y 80% respectivamente (Mukherjee & Bordoloi, 2012). Además de esto, Gudiña et al. (2013) reportaron que la capacidad productora de biosurfactantes lipopéptidos de *B. subtilis* promueve la degradación de hidrocarburos tóxicos al disminuir la tensión interfacial entre el contaminante y la fase acuosa para aumentar la biodisponibilidad del petróleo a los microorganismos degradadores (Gudiña et al., 2013). Por otro lado, *P. aeruginosa* es capaz de degradar de forma eficiente hidrocarburos de n-alcanos de bajo y alto peso molecular e hidrocarburos aromáticos policíclicos con una eficiencia de hasta un 91% y 98% respectivamente en condiciones in vitro (Medić et al., 2020; Rehman et al., 2021). Medić et al. (2020) reportan que la degradación de hidrocarburos por parte de esta bacteria es un proceso dependiente de los surfactantes producidos por la misma cepa. *P. aeruginosa* produce una mezcla de biosurfactantes, ramnolípidos y exopolisacáridos que facilitan la emulsificación de los hidrocarburos. Específicamente se seleccionó la cepa san ai por su propiedad halotolerante, metalotolerante, hidrocarbonoclasticas y alcalófilos. En la literatura se menciona la buena eficiencia degradadora de petróleo que tiene el co-cultivo de *B. subtilis* y *P. aeruginosa* en medio líquido, llegando a degradar hasta 57.56% (Ghorbannezhad et al., 2022; Mukherjee & Bordoloi, 2012; Pari et al., 2019; Safitri et al., 2018).

También se ha reportado la capacidad degradadora de diversos hidrocarburos de petróleo de la bacteria *A. baumannii*. Han sido propuestas como herramientas de biorremediación debido a que las bacterias del género *Acinetobacter spp.* son capaces de utilizar una gran variedad de sustratos como fuente de carbono además de crecer en un

amplio rango de temperaturas a diferentes pHs y ser productoras de biosurfactantes (Kämpfer, 2014). Se ha reportado la propiedad degradadora de bacterias de este género aisladas de muestras de agua y tierra contaminada con hidrocarburos de petróleo en todo el mundo, proporcionando resultados como 80.4% y 73.9% de degradación, además de otros buenos resultados bajo diferentes condiciones, siempre reportando alta eficiencia (Huang et al., 2013; Macaya et al., 2019; Nafian et al., 2016; Nkem et al., 2016). Se ha descrito que *A. baumannii* degrada hasta un 58.24% el petróleo crudo (Zhang et al., 2021) y 95.9% los alcanos del petróleo (Nkem et al., 2016).

También se han reportado hongos con la capacidad mineralizar estos compuestos, especies como *Phanerochaete chrysosporium*, *Phanerochaete laevis*, otros miembros del género *Phanerochaete spp.* y otros géneros como *Penicillium spp.*, *Chrysosporium spp.* y *Aspergillus spp.* donde se observó la capacidad de *A. niger* de reducir hasta en un 84% estos compuestos, y en porcentajes menores tenemos a *P. chrysosporium* con 52% y *Penicillium spp.* siendo de los más bajos con solo 16.45% de actividad frente a hidrocarburos de petróleo (Lugo, 2017; Saucedo, 2016)

En la literatura se ha reportado que los consorcios microbianos con mayor eficiencia de remoción de hidrocarburos de petróleo en ecosistemas marinos son aquellos que contienen bacterias pertenecientes al género *Pseudomonas spp.*, *Rhodococcus spp.*, *Acinetobacter spp.* y *Bacillus spp.* (Perdigão, 2021). Leal et al. (2018) describe una buena capacidad degradadora de diesel de un consorcio compuesto por dos cepas de *A. baumannii*, una de *P. aeruginosa*, una de *B. subtilis*, y una última cepa de *Ochrobactrum anthropi* pudiendo degradar hasta el 55% de los hidrocarburos presentados (Leal et al., 2018). El uso de consorcios microbianos compuestos de hongos y bacterias es muy común, aunque también se emplean otros microorganismos con capacidad de biodegradación como levaduras de los géneros *Candida spp.*, *Rhodotorula spp.*, *Exophiala spp.*, *Cryptococcus spp.*, y especies en específico como *Komagataella pastoris*, *Debaryomyces hansenii* y *Saccharomyces cerevisiae* (Ide et al., 2020; O'Connor et al., 2013; Padilla et al., 2021; Syed et al., 2010). Se ha reportado que el uso de consorcios de levaduras,

Artículos

enriquecidos con nanopartículas de óxido de zinc demostró ser eficiente en la degradación de benceno(a)pireno al elevar el metabolismo de las células alcanzando una degradación máxima del 76% (Padilla et al., 2021).

Biorremediación auxiliada por biosurfactantes

Los biosurfactantes son compuestos orgánicos que contienen un segmento polar y otro no polar, por lo que su solubilidad parcial les permite ocupar la interfase para así reducir la tensión superficial e interfacial y facilitar el proceso de biodegradación (Landa, 2017). Hay una amplia cantidad de bacterias que producen estos metabolitos entre los que se encuentran *Pseudomonas spp.*, *Bacillus spp.*, *Rhodococcus spp.*, *Nocardia spp.*, *Serratia spp.*, entre otros (Landa, 2017; Pérez et al., 2010; Temitope et al., 2021). Algunos géneros de hongos productores de biosurfactantes son *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*, *Fusarium spp.*, y *Ustilago spp.* (Alves Sanches et al., 2021; Barrionuevo, 2017; Becerra & Horna, 2016; Landa, 2017). También hay algunas levaduras productoras de

biosurfactantes como *Candida spp.* y *Yarrowia spp.* (Becerra & Horna, 2016; Landa, 2017). En otros estudios se ha observado que la adición de surfactantes en los consorcios microbianos puede aumentar la biodegradación y reducir eficazmente la cantidad de petróleo crudo en la superficie del agua de mar, lo que en torno ayuda al desarrollo de sistemas mejorados de biorremediación marina. Un candidato importante es *Sapindus saponaria*, productor de saponinas, un surfactante natural que puede modificar la membrana bacteriana y reduce la hidrofobicidad de las células, el cual cambia el comportamiento cinético de las células, lo que entonces podría resultar ventajoso en el tratamiento de áreas contaminadas con petróleo crudo. Además de surfactantes, la adición de biocarbón ha demostrado ser un poderoso estimulante en la actividad degradativa de algunos consorcios microbianos (Zhang & Zhang, 2022). En la Tabla 2, se presentan las condiciones ambientales a las cuales, los consorcios han demostrado ser eficientes para la remoción de contaminantes.

Tabla 2. Condiciones ambientales y contaminantes blanco de diferentes consorcios microbianos.

Consorcio/microorganismos	Condiciones ambientales (temperatura, oxígeno, pH)	Contaminante que degradan	Referencia
<i>Viridibacillus arenosi</i> , <i>Sporosarcina soli</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> y <i>E. cloacae</i>	30°C Condiciones aerobiaspH 7	Metales pesados	Kang et al., 2016
<i>Mucor racemosus</i> , <i>Marasmiellus spp.</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Dietzia maris</i>	28°C Condiciones aerobiaspH 8	Colorante RBBR	Alves Licursi et al., 2021
<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> y <i>Lactobacillus plantarum</i>	30°C Condiciones aerobiaspH 6	Desechos industriales orgánicos	Navarrete et al., 2022
<i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Ochrobactrum anthropi</i>	30°C Condiciones aerobiaspH 4.2-4.9	Múltiples hidrocarburos	Leal et al., 2018
<i>Chlamydomonas sp.</i> , <i>Desmodesmus sp.</i> y <i>Chlorella sp.</i>	20-25°C OD ¹ : 3 mg/L pH 6-9	Desechos industriales orgánicos	Navarrete et al., 2022

¹ OD: oxígeno disuelto

Conclusión

Esta revisión busca explorar las estrategias actuales aplicadas a uno de los principales problemas de contaminación, analizando los principales contaminantes de los ecosistemas marinos, desde hidrocarburos hasta pesticidas, y qué relaciones microbióticas pueden ser utilizadas para la biorremediación de estos ecosistemas. La biorremediación es una tecnología relativamente nueva que tiene gran potencial para la eliminación de contaminantes de mares y océanos, algo evidente después del análisis de este trabajo. Estos son sólo algunos ejemplos de la capacidad y versatilidad que ofrecen los consorcios microbianos en temas de biorremediación.

Referencias

- Alves Licursi VG, Cabral L, Ramos Otero IV, Ferro M, Uemura de Faria A, Maia de Oliveira V, Bacci M, & Durães Sette L (2021) Marine associated microbial consortium applied to RBBR textile dye detoxification and decolorization: Combined approach and metatranscriptomic analysis. *Chemosphere* 267(129190). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129190>
- Alves Sanches M, Galvão Luzeiro I, Alves Cortez AC, Simplício de Souza É, Melchionna Albuquerque P, Kumar Chopra H, & Braga de Souza JV (2021) Production of biosurfactants by ascomycetes. *International Journal of Microbiology* 2021, 11. <https://doi.org/10.1155/2021/6669263>
- Barrionuevo MR (2017) Producción de biosurfactantes bacterianos para su uso en procesos de biotratamiento de efluentes industriales con contenido en metales. Tesis de doctorado en en Química Biológica. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires Argentina. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6463_Barrionuevo.pdf
- Becerra L, Horna M (2016) Isolation of biosurfactant producing microorganisms and lipases from wastewaters from slaughterhouses and soils contaminated with hydrocarbons. *Scientia agropecuaria* 7(1):23–31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>
- Bharagava RN, Saxena G, Mulla SI (2020) Introduction to industrial wastes containing organic and inorganic pollutants and bioremediation approaches for environmental management. En *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety* (pp. 1–18). Springer Singapore.
- Carvalho FP (2017) Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security* 6(2):48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chiriví Salomón JS, Fajardo Gómez CA, Gómez Rodríguez LA, Delgado Tovar SD (2020) Biorremediación de hidrocarburos saturados y aromáticos policíclicos. En *Revisión y panorama nacional de la biorremediación microbiana*. Escuela de Ciencias Agrícolas (ed.).
- Dash HR, Mangwani N, Chakraborty J, Kumari S, Das S (2013) Marine bacteria: potential candidates for enhanced bioremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97(2):561–571. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4584-0>
- Dell' Anno F, Rastelli E, Sansone C, Brunet C, Ianora A, Dell' Anno A (2021) Bacteria, fungi and microalgae for the bioremediation of marine sediments contaminated by petroleum hydrocarbons in the omics era. *Microorganisms* 9(8):1695. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081695>
- Frid CLJ, Caswell BA (2017) *Marine Pollution*. Oxford University Press.
- Fuentes S, Méndez V, Aguila P, Seeger M (2014) Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology* 98(11):4781–4794. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5684-9>

Artículos

GESAMP (1990) Report of the Twentieth Session. <http://www.gesamp.org/publications/report-of-the-20th-session>

Ghorbannezhad H, Moghimi H, Dastgheib SMM (2022) Biodegradation of high molecular weight hydrocarbons under saline condition by halotolerant *Bacillus subtilis* and its mixed cultures with *Pseudomonas* species. *Scientific Reports* 12(1):13227. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17001-9>

Gudiña EJ, Pereira JFB, Costa R, Coutinho JAP, Teixeira JA, Rodrigues L R (2013) Biosurfactant-producing and oil-degrading *Bacillus subtilis* strains enhance oil recovery in laboratory sand- pack columns. *Journal of Hazardous Materials* 261:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.071>

Hernández Ruiz GM, Álvarez Orozco NA, Ríos Osorio LA (2016) Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 18(1):139. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:564

Hosokawa R, Nagai M, Morikawa M, Okuyama H (2009) Autochthonous bioaugmentation and its possible application to oil spills. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 25(9):1519–1528. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0044-0>

Huang L, Xie J, Lv BY, Shi XF, Li GQ, Liang FL, Lian JY (2013) Optimization of nutrient component for diesel oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS. *Marine Pollution Bulletin* 76(1–2):325–332. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.037>

Husain R, Vikram N, Yadav G, Kumar D, Pandey S, Patel M, Khan NA, Hussain T (2022) Microbial bioremediation of heavy metals by Marine bacteria. En *Development in Wastewater Treatment*

Research and Processes. Elsevier. pp. 177–203

Ide Pérez MR, Fernández López MG, Sánchez Reyes A, Leija A, Batista García RA, Folch Mallol J L, Sánchez Carbente MDR (2020) Aromatic hydrocarbon removal by novel extremotolerant *Exophiala* and *Rhodotorula* spp. From an oil polluted site in Mexico. *Journal of Fungi* 6(3):135. <https://doi.org/10.3390/jof6030135>

Kämpfer P (2014) *Acinetobacter*. En *Encyclopedia of Food Microbiology*. Elsevier. pp. 11–17. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384730-0.00002-1>

Kang CH, Kwon YJ, So JS (2016) Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures. *Ecological Engineering* 89:64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.023>

Kennish MJ (2017) *Practical handbook of estuarine and marine pollution*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203742488>

Kumar PS, Prasannamedha G (2021) Biological and chemical impacts on marine biology. En *Modern Treatment Strategies for Marine Pollution*. Elsevier. pp. 11–27. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822279-9.00006-3>

Landa Faz MCA (2017) *Producción y aplicación de un biosurfactante producido por el consorcio microbiano para la biorremediación de suelos agrícolas contaminados con endosulfán*. Tesis Doctorado en Ciencias Biotecnológicas. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/3418/SSIT0016561.pdf?sequen ce=1>

Lawal AT (2017) Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review. *Cogent Environmental Science* 3(1):1339841. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1339841>

Ławniczak Ł, Woźniak Karczewska M, Loibner AP, Heipieper HJ, Chrzanowski Ł (2020) Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: A review. *Molecules* 25(4):856.

<https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

6

Leal PL, Pinheiro Dadalto S, Fernandes RCR, Queiroz MELR, Tótola MR (2018) Enrichment of population density of a bacterial consortium during bioremediation of a soil under successive contaminations with diesel oil. *Acta scientiarum. Biological sciences* 40(1):36904.

<https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v40i1.36904>

Lugo Mancilla LL (2017) Interpretación conceptual del estado actual de la biorremediación realizada por microorganismos sobre hidrocarburos aromáticos policíclicos derivados del petróleo. Universidad de Manizales.

Macaya CC, Méndez V, Durán RE, Aguila Torres P, Salvà Serra F, Jaén Luchoro D, Moore ERB, Seeger M (2019) Complete genome sequence of hydrocarbon-degrading halotolerant *Acinetobacter radioresistens* DD78, isolated from the Aconcagua River mouth in central Chile. *Microbiology Resource Announcements* 8(33). <https://doi.org/10.1128/MRA.00601-19>

19

Macchi M (2018) Desarrollo de consorcios bacterianos con alta eficiencia de degradación de PAH para su aplicación a la recuperación de suelos crónicamente contaminados. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina.

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/665>

53

Medić A, Lješević M, Inui H, Beškoski V, Kojić I, Stojanović K, Karadžić I (2020) Efficient biodegradation of petroleum n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons by polyextremophilic *Pseudomonas aeruginosa* strain with multidegradative capacity. *RSC Advances*

10(24):14060–14070.

<https://doi.org/10.1039/c9ra10371f>

Molina Castro RE, Gómez Ronquillo WJ, Cruz Lozado J (2021) Contaminación marina por desechos plásticos en países del perfil costero del Pacífico Sur, 2016-2021. *Polo de Conocimiento* 6(5):458–478. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i5.2671>

Morrillo Zambrano PA (2017) Caracterización de consorcios microbianos con capacidad biorremediadora de pesticidas piretroides (Cipermetrina), organofosforados (Clorpurifos) y N-(fosfometil) glicina (GLIFOSATO). Tesis Maestría en Gestión Ambiental. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/5041/1/T-UTEQ-015.pdf>

Mukherjee AK, Bordoloi NK (2012) Biodegradation of benzene, toluene, and xylene (BTX) in liquid culture and in soil by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains and a formulated bacterial consortium. *Environmental Science and Pollution Research International* 19(8):3380–3388.

<https://doi.org/10.1007/s11356-012-0862-8>

Nafian F, Gharavi S, Soudi MR (2016) Degenerate primers as biomarker for gene-targeted metagenomics of the catechol 1, 2-dioxygenase-encoding gene in microbial populations of petroleum-contaminated environments. *Annals of Microbiology* 66(3):1127–1136.

<https://doi.org/10.1007/s13213-016-1197-3>

Navarrete Álava J, Noles Aguilar P, Delgado Villafuerte C, Hernández de Guerrero N, Guerrero Ríos R (2022) Biorremediación de efluentes del cultivo de camarón por medio de consorcios microbianos autóctonos y microalgas nativas en Manabí, Ecuador. *AquaTechnica* 4(1):53–65.

<https://doi.org/10.33936/at.v4i1.4635>

Nkem BM, Halimoon N, Yusoff FM, Johari WLW, Zakaria MP, Medipally SR, Kannan N (2016) Isolation, identification and diesel-oil biodegradation capacities of indigenous hydrocarbon-degrading strains of *Cellulosimicrobium cellulans* and

Artículos

Acinetobacter baumannii from tarball at Terengganu beach, Malaysia. Marine Pollution Bulletin 107(1):261–268.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.060>

Ochoa Carreño DC, Montoya Restrepo A (2010) Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Militar Nueva Granada 18.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v18n2/v18n2a04.pdf>

O'Connor STF, Lan J, North M, Loguinov A, Zhang L, Smith MT, Gu AZ, Vulpe C (2012) Genome-wide functional and stress response profiling reveals toxic mechanism and genes required for tolerance to Benzo[a]pyrene in *S. cerevisiae*. Frontiers in Genetics 3:316.
<https://doi.org/10.3389/fgene.2012.00316>

Ojuederie O, Babalola O (2017) Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. International Journal of Environmental Research and Public Health 14(12):1504.
<https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>

Padilla Garfías F, Silvia Sánchez N, Calahorra M, Peña A (2021) Levaduras degradadoras de hidrocarburos aromáticos policíclicos. Revista de Educación Bioquímica 40(4):178–188.
<https://www.medigraphic.com/pdfs/revedu/bio/reb-2021/reb214d.pdf>

Paniagua Michel J (2015) Marine bioremediation - A sustainable biotechnology of petroleum hydrocarbons biodegradation in coastal and marine environments. Journal of bioremediation & biodegradation 6(2).
<https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000273> ,

Pari P, Thillipan M, Queenie A (2019) Bioremediation of Oil Sludge using Pseudomonas Aeruginosa, Bacillus Subtilis and Brassica Juncea. International Journal of Engineering Research & Technology

8(10).
<https://www.ijert.org/research/bioremediation-of-oil-sludge-using-seudomonas-aeruginosa-bacillus-subtilis-and-brassica-iuncea-IJERTV8IS100306.pdf>

Pérez Vargas J, Anaya Reza O, Chang Solis CK, Membrillo Venegas IL, Calva Calva G (2010) Producción de biosurfactantes por bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno crecidas en hidrocarburos. Revista CENIC. Ciencias Químicas 41:1–9.
<https://www.redalyc.org/pdf/1816/181620500027.pdf>

Piraban Ramírez D, Rincón Martínez D (2018) Propuesta de un proceso de biorremediación bacteriana en suelos empleados para el cultivo de arroz en Paz de Ariporo a partir de una revisión bibliográfica. Tesis Licenciatura en Ingeniería Ambiental. Universidad El Bosque. Bogotá, Colombia.
https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3292/Piraban_Ram%C3%ADrez_Daniela_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Raimondo EE, Fuentes MS, Benimeli CS (2017) Biorremediación de una mezcla de plaguicidas por actinobacterias: Empleo de un consorcio de actinobacterias para remover una mezcla de plaguicidas organoclorados en distintos sistemas. Editorial Académica Española.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/158751>

Rehman R, Ali MI, Ali N, Badshah M, Iqbal M, Jamal A, Huang Z (2021) Crude oil biodegradation potential of biosurfactant-producing Pseudomonas aeruginosa and Meyerozyma sp. Journal of Hazardous Materials 418(126276):126276.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126276>

Safitri RM, Mangunwardoyo W, Ambarsari H (2018) Biodegradation of diesel oil hydrocarbons using Bacillus subtilis InaCC B289 and Pseudomonas aeruginosa InaCC B290 in single and mixed cultures. AIP Conference Proceedings.

Artículos

<https://doi.org/10.1063/1.5062737>

Saucedo Martínez BC (2016) Bioestimulación de suelo contaminado con 60,000 ppm de aceite residual automotriz con detergente, extracto fúngico, H₂O₂, solución mineral y fitorremediación por *Sorghum vulgare* con *Penicillium chrysogenum* y *Aspergillus niger*. Tesis Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmli/bitstream/handle/DGB_UMICH/4748/FIQ-M-2016-1512.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Singh P, Kumar A, Borthakur A (2019) Abatement of environmental pollutants: Trends and strategies. Elsevier Science Publishing.

Sivaperumal P, Kamala K, Rajaram R (2017) Bioremediation of industrial waste through enzyme producing marine microorganisms. *Advances in Food and Nutrition Research* 80:165–179.

<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.10.006>

Souza EC, Vessoni Penna TC, de Souza Oliveira RP (2014) Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. *International Biodeterioration & Biodegradation* 89:88–94.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.007>

Syed K, Doddapaneni H, Subramanian V, Lam YW, Yadav JS (2010) Genome-to-function characterization of novel fungal P450 monooxygenases oxidizing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs).

Biochemical and Biophysical Research Communications 399(4):492–497.

<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.07.094>

Tao K, Liu X, Chen X, Hu X, Cao L, Yuan X (2017) Biodegradation of crude oil by a defined co-culture of indigenous bacterial consortium and exogenous *Bacillus subtilis*. *Bioresource Technology*

224:327–332.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.073>

Temitope KK, Ayanfemi AA, Rebecca OK, Hannah AY, Lawrence EJ, Ayanbukola AA, Adewumi AK, Samson Thompson O, Martha OI, Ayomide AO, Ayodeji OP, Oluwadamilare T (2021) Biosurfactant producing abilities of some bacteria isolated from bitumen contaminated soils. *Open Journal of Environmental Biology* 6(1):26–34.

<https://doi.org/10.17352/ojeb.000023>

Varjani SJ (2017) Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology* 223:277–286.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>

Vinayaka KS & Kadkol S (2022) Biological Approaches to Controlling Pollutants, Advances in bioremediation of organometallic pollutants: strategies and future road map. In: *Biological Approaches to Controlling Pollutants Advances in Pollution Research*. Elsevier Inc. pp. 233-239

Xu X, Liu W, Tian S, Wang W, Qi Q, Jiang P, Gao X, Li F, Li H, Yu H (2018) Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: A perspective analysis. *Frontiers in Microbiology* 9:2885.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>

Zhang T, Zhang H (2020) Microbial Consortia Are Needed to Degrade Soil Pollutants. *Microorganisms* 10(2):261.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms10020261>

Zhang X, Kong D, Liu X, Xie H, Lou X, Zeng C (2021) Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. *Chemosphere* 273(129666):129666.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129666>