

Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023

Hydrocarbon contaminated soils bioremediation in Latin America: 2010- 2023 review

Tomás Darío Marín Velásquez¹

¹Universidad de Oriente Venezuela, Unidad de postgrado Núcleo de Monagas
Campus Juanico, Maturín, Monagas, Venezuela
E mail: tmarin@udo.edu.ve

Marin Velasquez, T. D. (2024). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Revista Estudios Ambientales*, 12 (1), 27- 43.

Recibido: 19/02/2024 - **Aceptado:** 03/07/2024 – **Publicado:** 31/07/2024

RESUMEN

La contaminación del suelo por hidrocarburos es un problema a nivel mundial dado el uso extendido de combustibles fósiles, siendo la biorremediación una de las técnicas más eficientes y económicas para la recuperación de estos suelos. El objetivo de la revisión fue analizar las alternativas de biorremediación aplicadas en estudios desarrollados por investigadores Latinoamericanos, para analizar las tendencias investigativas, bibliométricas y los principales resultados obtenidos. Los documentos se extrajeron a partir del motor de búsqueda Google académico, tomando como criterios de inclusión artículos publicados entre 2010 y 2023 de autores Latinoamericanos, en revistas indexadas en bases de datos de prestigio regional y global (Lantindex, Redalyc, SciELO y Scopus), en idioma español o inglés y que presentaran resultados cuantitativos de eficiencia de remoción de hidrocarburos. La información se trató de forma descriptiva según las características de los artículos y a través de pruebas estadísticas ANOVA y árboles de clasificación-regresión, para observar diferencias y similitudes entre las eficiencias reportadas. Se obtuvo un total de 22 artículos de los cuales 31,4 y 26,5% fueron de México y Venezuela respectivamente, la mayoría en idioma español (68,0%) y publicados en revistas de impacto regional (55,0%). Se identificaron 27 agentes remediadores, de ellos el más utilizado fue Bacterias autóctonas del suelo (25,9%) y los hidrocarburos de petróleo como los contaminantes más utilizados (51,9%), eficiencias de remoción entre 8,1 y 96,4%. Se utilizaron 7 grupos

de agentes contaminantes clasificados según su eficiencia, siendo los más eficientes Bacterias+Levaduras, Lodos residuales y Extracto de *Sapindus saponaria* con valores de remoción mayores a 92,8%. No se observó influencia del tipo de hidrocarburos contaminante en la eficiencia de remoción. Se concluye que la biorremediación es eficiente para la remoción de los hidrocarburos del suelo contaminado, con una dependencia del tipo de agente biorremediador utilizado.

PALABRAS CLAVE: Biorremediación, petróleo, análisis bibliográfico, hidrocarburos, biodegradación.

ABSTRACT

Soil contamination by hydrocarbons is a worldwide problem due to the widespread use of fossil fuels, bioremediation being one of the most efficient and economical techniques for the recovery of these soils. The objective of this review was to analyze the bioremediation alternatives applied in studies developed by Latin American researchers in order to analyze both the research and bibliometric trends as well as the main results obtained. The documents were extracted from the academic Google search engine, taking as inclusion criteria articles published between 2010 and 2023 by Latin American authors in journals indexed in databases of regional and global prestige (Lantindex, Redalyc, SciELO and Scopus), both in Spanish and English languages and presenting quantitative results of hydrocarbon removal efficiency. The information was treated descriptively according to the characteristics of the articles and through ANOVA statistical tests and classification-regression trees to observe differences and similarities between the reported efficiencies. Twenty two articles were obtained, out of which 31.4% and 26.5% were from Mexico and Venezuela respectively, most of them in Spanish (68.0%) and published in regional impact journals (55.0%). Twenty-seven remediating agents were identified out of which the most used was indigenous soil bacteria (25.9%), petroleum hydrocarbons were the most used contaminants (51.9%), and removal efficiencies were between 8.1% and 96.4%. Seven groups of contaminants classified according to their efficiency were used, the most efficient being Bacteria + yeasts, sewage sludge, and Sapindus saponaria extract with removal values greater than 92.8%. No influence of the type of contaminating hydrocarbons on the removal efficiency was observed. It is concluded that bioremediation is efficient for the removal of hydrocarbons from contaminated soil depending on the type of bioremediation agent used.

KEY WORDS: Bioremediation, oil, bibliographic analysis, hydrocarbons, biodegradation.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por hidrocarburos representa un problema ambiental grave que afecta en gran medida a los países productores de petróleo, aunque se ha convertido en un problema global por el alto consumo de combustibles fósiles. En Latinoamérica existen varios países cuyas economías dependen en gran medida de la industria petrolera, por lo que la contaminación del suelo por hidrocarburos está presente en ellos, de allí que la investigación sobre alternativas de tratamiento para la recuperación del suelo sea importante en la región. De acuerdo con Herrera-Franco et al. (2021) la relación entre el petróleo y el medio ambiente ha estado siempre en discusión en todos los países, incluidos los de Latinoamérica con producción y consumo de petróleo, como Venezuela, Brasil, México, Colombia, Ecuador, Perú y Argentina. Sobre todo los países Sudamericanos que se encuentran entre los más megadiversos del planeta y su entorno natural se ve afectado por las actividades petroleras, lo que incluye daños ambientales por vertidos de sustancias tóxicas y emisiones de gases y las alteraciones naturales en los ecosistemas de agua dulce y marina.

En el suelo, la contaminación por hidrocarburos, causa daños en su estructura, pérdida orgánica y de nutrientes. Sustancias químicas como el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son componentes del petróleo extremadamente tóxicos, por lo que el riesgo de exposición por contacto con la piel o ingestión está relacionado con la tendencia de estos compuestos a absorberse en las partículas del suelo y también en la vegetación a través de la absorción por las raíces, lo que puede llevar a que entren en la cadena alimentaria (Adipah, 2019). Por otra parte, el riesgo de exposición por inhalación de hidrocarburos volátiles es un problema

latente, ya sea directamente desde el suelo o desde fuentes de agua que hayan quedado impactadas tras su vertido. De allí que el suelo contaminado afecta a la salud humana a través de la inhalación de la mezcla de sustancias químicas que se vaporizan, lo que evidentemente depende del tipo de contaminante, de la vía de ataque y la exposición al mismo (Adipah, 2019). Por tal motivo, la contaminación por hidrocarburos, afecta negativamente a los ecosistemas terrestres, alterando las actividades metabólicas de los microorganismos presentes en el mismo (Gao et al., 2022).

El estudio de la biorremediación como alternativa a la restauración de ambientes contaminados por hidrocarburos ha sido desarrollado a lo largo de los años, debido a la eficiencia que han mostrado algunos microorganismos en la degradación de los hidrocarburos. Este proceso se refiere a la capacidad de los microorganismos para descomponer diferentes contaminantes peligrosos, y tiene un papel cada vez más clave en la desintoxicación de suelos y aguas subterráneas contaminados, con base en la capacidad del metabolismo enzimático de los microorganismos para transformar contaminantes orgánicos en compuestos menos peligrosos (Canak et al., 2019). Por ello en la región Latinoamericana se han producido diferentes estudios donde la biorremediación es el proceso central en la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos, por ello se ha desarrollado la presente revisión donde se ha propuesto como objetivo analizar las alternativas de biorremediación aplicadas en estudios llevados a cabo por investigadores de Latinoamérica, para observar y analizar las tendencias investigativas, bibliométricas y los principales resultados obtenidos, con la finalidad de dar a conocer los avances en esta temática en los últimos 14 años

METODOLOGÍA

Obtención de datos

Para la obtención de los datos se procedió a buscar en la web, con el motor de búsqueda de literatura académica Google Académico, mediante un filtrado entre los años 2010 y 2023, utilizando las palabras clave, en español:

“BIORREMEDIACIÓNDESUELOS” +
 “HIDROCARBUROS” + “PETRÓLEO” +
 “LATINOAMÉRICA”

en inglés:

“SOILREMEDIATION”
 + “HYDROCARBONS”
 + “OIL”
 + “LATINAMERICA”

Se establecieron los criterios de inclusión y exclusión que se muestran en la Fig. 1.

El proceso de selección de los datos se detalla en la Fig. 2.

Información recopilada de los artículos revisados

Se obtuvieron datos relacionados con las características bibliométricas básicas de cada artículo (año, país del estudio, país de publicación, idioma, revista e indexación de la revista). También se extrajo información relevante como título, palabras clave, objetivo, estadística aplicada, tipo de hidrocarburo contaminante y tipo de agente biorremediador. Como aportes de los artículos se tomaron en cuenta, el porcentaje máximo de remoción y conclusión relevante. Esta información se registró en una hoja de cálculo diseñada para tal fin en el programa LibreOffice Calc versión 7.6

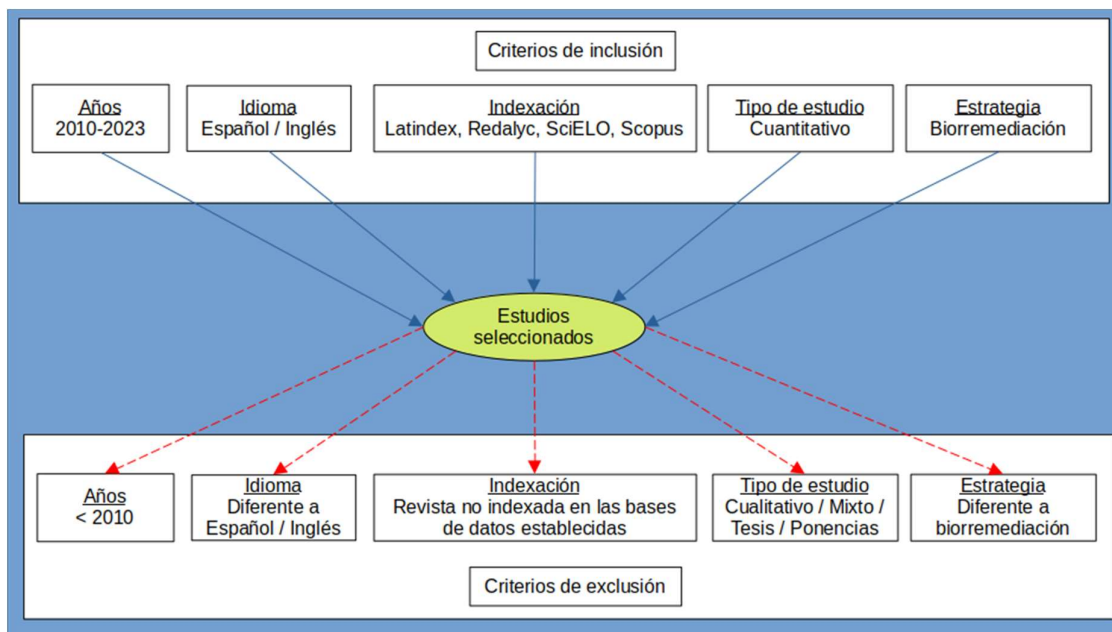


Figura 1. Criterios de inclusión y exclusión de los artículos para los estudios

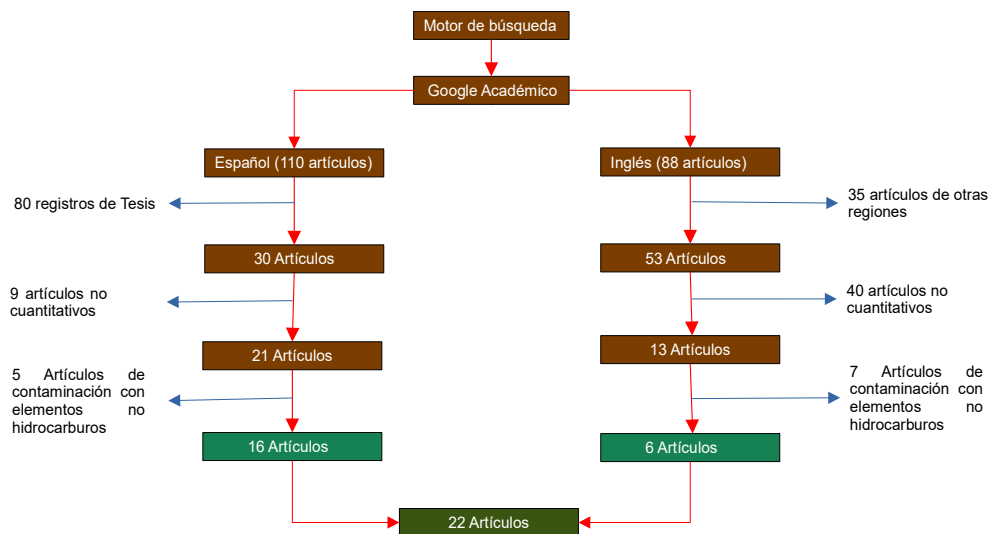


Figura 2. Esquema del proceso de obtención de los datos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de los artículos científicos seleccionados

La distribución de los artículos científicos publicados en Latinoamérica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos según el año de publicación en el lapso de estudio se muestra en la Fig. 3.

Como puede observarse, los años de mayor producción respecto a la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos fueron 2016, 2017 y 2020 con tres artículos en cada año (13,6%), lo que representa entre los tres el 40,8% del total de 22 artículos. Con dos artículos publicados se tiene a los años 2015, 2018, 2021 y 2023 lo que representa el 34,8% del total, quedando así un 24,4% restante que corresponde al resto de los 12 años evaluados. .

Con respecto al país de origen de los artículos y al país de publicación, los resultados se detallan en las Fig. 4a y 4b. Las investigaciones sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos se centraron en 8 países, destacando México con 7 publicaciones (31,4%) y Venezuela con 6 publicaciones (26,5%), con Perú como el tercer país con 3 publicaciones (13,7% y Ecuador con 2 publicaciones (8,8%), entre estos 4 países acumularon el 80,4% del total de las publicaciones revisadas. En el caso de México y Venezuela son países con un amplio historial de extracción y comercialización de petróleo, por lo que la contaminación producto de la actividad petrolera es una cuestión inherente a las operaciones y es de esperarse que en ellos se produzcan investigaciones tendientes a remediar este problema, lo que justifica que el 57,9% de los artículos se generaron en estos dos países. .

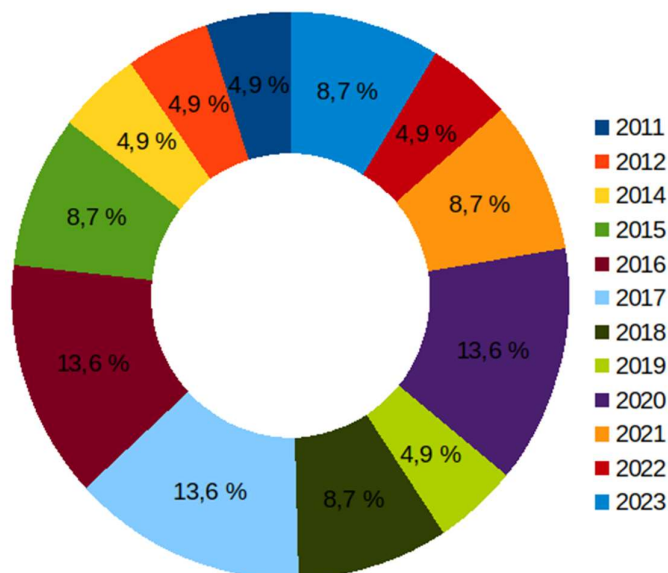


Figura 3. Distribución de los artículos revisados de acuerdo al año de publicación

Muñoz et al. (2019) hacen referencia al impacto ambiental negativo que ha tenido la industria petrolera en México y hacen referencia a que se han afectado suelos agrícolas, impactando sobremanera la calidad de vida de las poblaciones, esto evidentemente ha influenciado la generación de estudios de biorremediación en ese país. En el caso de Venezuela, un informe generado por el Observatorio Venezolano de Derechos Humanos Ambientales (OVDHA, 2022) da cuenta de que entre los años 2016 y 2021 se produjeron 199 derrames importantes de petróleo en el país, que han afectado mayormente a los suelos, lo que también justifica el hecho de que este sea el segundo mayor país productor de investigaciones en biorremediación entre los seleccionados para esta investigación. Respecto al idioma y la indexación de los artículos, los resultados se muestran en las Fig. 5a y 5b.

Mayoritariamente los artículos sobre la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos se publicaron en

español (68,0%), esto se debe principalmente a que este es el idioma mayoritario en la región, además de que en su mayoría los estudios fueron publicados en revistas científicas regionales, que aunque publican en idioma inglés como segunda lengua, tienen al español como idioma principal, tal como lo expresan Plaza et al. (2018) el idioma español se muestra como principal en más del 75,0% de las revistas científicas editadas en España y Latinoamérica en todas las áreas de conocimiento, lo que es consistente con lo observado en este estudio.

Respecto a la indexación (Figura 4b), Scopus representa la base de datos de mayor presencia con el 45,0% de las revistas registradas, con Latindex y SciELO en proporciones iguales de 23,0% y Redalyc con el 9,0%, lo anterior demuestra que el 55,0% de las publicaciones sobre la temática en estudio se publicaron en revistas indexadas a nivel regional, lo que denota la importancia de los índices regionales para los autores de

la región, además de que se proporciona fiabilidad y prestigio a estudios cuyo impacto es más bien regional, siendo para Salatino (2019) la indexación la extensión de la visibilidad de las publicaciones, al estar contenidas en un sitio web y con acceso libre en la mayoría de los casos de

las revistas de la región, lo que además contribuye a la difusión democrática del conocimiento (Hernández et al., 2020) en este caso las metodologías de biorremediación a nivel regional.

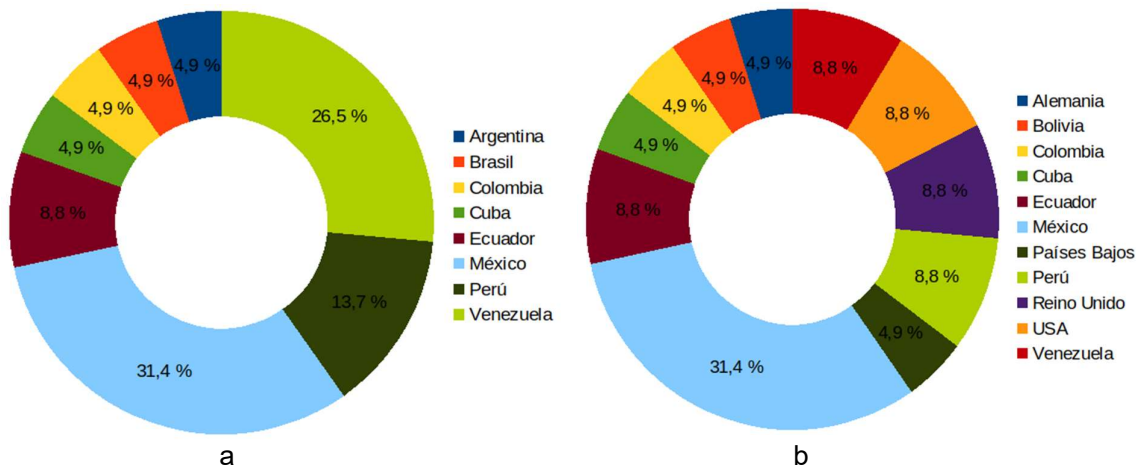


Figura 4. Distribución de los artículos según el país de origen de la investigación (a) y el país de su publicación (b)

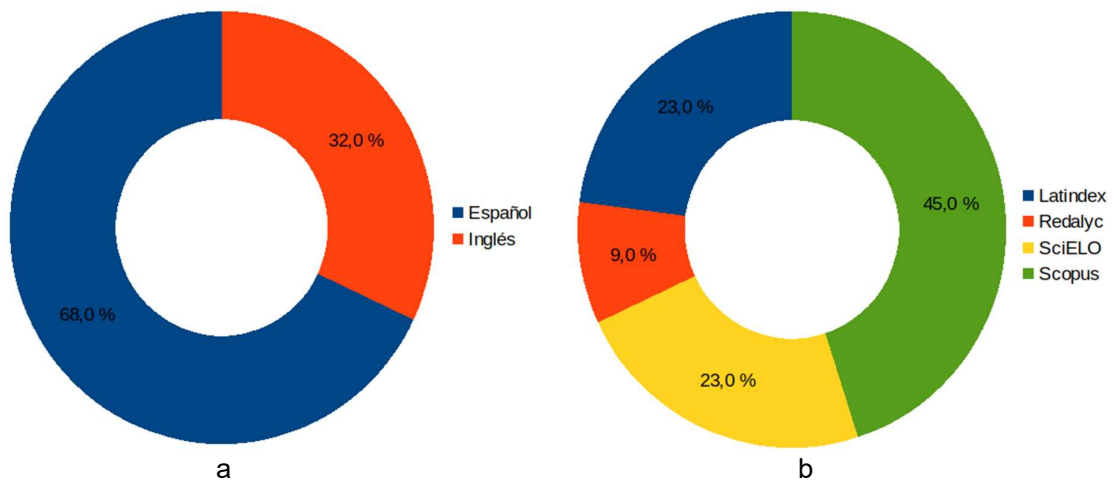


Figura 5. Distribución de los artículos de acuerdo al idioma de publicación (a) y a la indexación de la revista donde fue publicado (b).

Análisis de los artículos con base en su contenido
 El análisis de las palabras clave utilizadas en los estudios seleccionados mediante el uso de nubes de palabras, llevó a crear

una imagen con las principales palabras utilizadas, la cual se puede detallar en la Fig. 6.



Figura 6. Nube de palabras elaborada con las palabras clave de los artículos revisados
 Fuente: elaboración propia con la herramienta online <https://www.wordclouds.com/>

Destacan en la figura 6 cuatro palabras principales: hidrocarburos, biorremediación, contaminación y petróleo, también denotan importancia palabras como bioestimulación, impacto, *Citrus sinensis*, suelo, microorganismos, biodegradación, microorganismos, remediación y *Bacillus*. Es de hacer notar que en esta nube de palabras, se visualizan algunas de importancia para los procesos de biorremediación, como microorganismos, *Bacillus* y *Citrus sinensis*, los cuales fueron aplicados como agentes biorremediadores de los hidrocarburos en la mayoría de los estudios consultados.

Respecto a los agentes empleados como biorremediadores en suelos contaminados con hidrocarburos, luego de la revisión de cada uno de los estudios seleccionados, se constató el uso de 15 agentes, que se aplicaron para remediar suelos contaminados y que se investigó sobre un total de 5 tipos de hidrocarburos, desde aceite de motor, hasta biodiésel, incluyendo diésel de petróleo, gasolina e hidrocarburos provenientes del petróleo, en algunos casos estos últimos referidos a petróleo crudo, lo que se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de agentes biorremediadores e hidrocarburos contaminantes utilizados en los estudios sobre biorremediación entre 2010 y 2023 en Latinoamérica

Tipo de agente biorremediador	Tipo de hidrocarburo contaminante					Total
	Aceite automotriz	Biodiésel	Diésel de petróleo	Gasolina	Hidrocarburos de petróleo	
Aceite de <i>Pinus patula</i>	0	0	1	0	0	1
Aserrín	0	0	0	0	1	1
Bacteria y Levadura	0	0	1	0	0	1
Bacterias autóctonas del suelo	2	2	1	0	2	7
Compost	0	0	1	0	0	1
Estiércol	0	0	0	0	1	1
Estiércol +Aserrín	0	0	0	0	2	2
Estiércol vacuno y pleurotina	0	0	0	0	1	1
Extracto de cáscaras de <i>Citrus sinensis</i>	0	0	1	1	2	4
Extractos de <i>Sapindus saponaria</i>	0	0	1	0	0	1
Hongos autóctonos del suelo	0	0	0	0	2	2
Lixiviado de la fibra de coco	0	0	0	0	1	1
Lodos residuales	0	0	1	0	0	1
Plantas autóctonas, lombrices autóctonas y bacterias autóctonas del suelo	0	0	0	0	1	1
Vermicomposta	0	0	1	0	1	2
Total	2	2	8	1	14	27

Como se detalla en la Tabla 1, el agente biorremediador más aplicado fue las bacterias autóctonas del suelo, las cuales estuvieron presentes de forma individual en 7 de los estudios (31,8%) y en combinación con otros biorremediadores en dos estudios más, por lo que fueron utilizadas en 9 estudios, que representa el 40,9% del total (Islas-García et al., 2016; Cruz et al., 2016; Vargas et al., 2017; Raju et al., 2017; Bertel-Sevilla et al., 2018; Rodríguez-Campos et al., 2019; Vizuete et al., 2020; Decesaro et al., 2021). Los agentes contaminantes más utilizados fueron los hidrocarburos del petróleo y el diésel de petróleo con un porcentaje de 81,4%. Otro trabajo de importancia es el trabajo de Raju et al. (2017) quienes aplicaron bacterias autóctonas a tres suelos contaminados con diésel de petróleo, aceite de motor y petróleo crudo.

En estos estudios con bacterias destacó el diseño experimental factorial y el uso de análisis de varianza (ANOVA) en 6 de ellos, con uno donde la estadística se basó en análisis de conglomerados (Cruz et al., 2016) y uno descriptivo donde el análisis se basó en los valores obtenidos de ensayos de laboratorio, sin aplicar diseño experimental (Islas-García et al., 2016). Por otra parte se debe hacer mención al trabajo de Vizuete et al.(2020) que aun cuando establece un diseño experimental y una análisis estadístico, sus resultados solo se muestran de forma cualitativa, por lo que se considera un estudio incompleto, ya que no se tiene evidencia cuantitativa del logro del objetivo.

El uso de bacterias autóctonas del suelo, es una técnica muy extendida en la biorremediación de suelos contaminados, no solo con hidrocarburos, sino con otros



contaminantes, lo que es mencionado por Nazia et al. (2019) quienes hacen referencia a que la biorremediación microbiana, especialmente la bacteriana, ha ganado gradualmente la atención mundial como un método potencial, menos dañino, respetuoso con el medio ambiente y económicamente viable para descontaminar/desintoxicar entornos contaminados, de allí que se haya utilizado este agente como remediador biológico en la mayoría de los estudios realizados como alternativa para suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica durante el periodo de estudio.

También se evidencia el uso de otros agentes biorremediadores como el extracto de cáscaras de *Citrus sinensis* o naranja dulce (Marín, 2016; Marín, 2017, Marín y Arriojas, 2020; Marín-Velásquez & Barrutia-Barreto, 2020) representando un 18,2% del total de los estudios analizados; el estiércol de ganado, el cual se aplicó en combinación con aserrín en dos estudios (Buendía, 2012; de La Cruz et al., 2023), como agente individual (Buendía, 2012) y en combinación con pleurotina (Nápoles et al., 2015), por lo que el estiércol se usó en el 13,6% de los estudios. Los hongos autóctonos del suelo y el vermicompost también se visualizaron como alternativas en cuatro estudios (Medina et al., 2014; Maddela et al., 2015; Nobili et al., 2022; Ojeda-Morales et al., 2023). Aunque el mecanismo biorremediador de los extractos vegetales no está del todo definido, su uso ha demostrado que es una alternativa viable, como el caso de los extractos de *Citrus sinensis* o de *Sapindus saponaria* (Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021) así como el lixiviado de fibra de coco (Marín et al., 2018), lo que también fue reportado por Li et al. (2021) al utilizar dos extractos vegetales (*Oxalis*

corniculata y *Medicago sativa*) junto con ácido cítrico para la remediación de un suelo contaminado por metales pesados, demostrando su efectividad aunque específica que al no estar claro el mecanismo, sus resultados sirven de base teórica.

El uso de estiércol y el vermicomposta actúa en el suelo proporcionando nutrientes esenciales para la actividad microbiana, de allí que sean una alternativa al uso de nutrimentos de origen químico, algo que es común en agricultura, de allí que sea una alternativa en la biorremediación y por ende dos de los agentes más utilizados en los estudios revisados, esto se compagina con lo expresado por Luo et al. (2021) quienes demostraron que la enmienda con estiércol como práctica para mejorar los nutrientes del suelo y las actividades microbianas puede resolver los problemas de baja eficiencia de la atenuación natural para eliminar los contaminantes con eficiencias mayores al 80,0%, En el caso del vermicomposta el efecto es similar al del estiércol, lo que también fue corroborado por estudios como el de Liu et al. (2019) que demostró su eficiencia para remover metales y concuerda con lo observado en los estudios revisados. También se observaron otros agentes remediadores no de menor importancia, ya que igualmente mostraron eficiencia, como lodos residuales (Martínez-Prado et al., 2011), lombrices y plantas autóctonas (Rodríguez-Campos et al., 2019), compost y lombrices (Nobili et al., 2022) y aceite de pino (Marín-Velásquez & Barrutia-Barreto, 2020).

La eficiencia de de remediación de los agentes utilizados en los estudios es clave para comprender la utilidad de los mismos, de allí que fue un dato de importancia, lo que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de remoción máxima reportada en los estudios revisados sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica (2010-2023)

Autor	Tipo de agente biorremediador	Remoción máxima (%)
Martínez-Prado et al. (2011)	Lodos residuales	93,0
	Estiércol +Aserrín	22,5
Buendía (2012)	Estiércol	16,5
	Aserrín	9,6
Medina et al. (2014)	Hongos autóctonos del suelo	85,0
Nápoles et al. (2015)	Estiércol vacuno y pleurotina	52,0
Islas-García et al. (2016)	Bacteria y Levadura	93,0
Cruz et al. (2016)	Bacterias autóctonas del suelo	84,6
Marín (2016)	Extracto de cáscaras de Citrus sinensis	90,5
Marín (2017)	Extracto de cáscaras de Citrus sinensis	90,9
Marín et al. (2018)	Lixiviado de la fibra de coco	90,1
Marín & Arriojas (2020)	Extracto de cáscaras de Citrus sinensis	96,4
Marín-Velásquez & Barrutia-Barreto (2020)	Extracto de cáscaras de Citrus sinensis	92,1
	Aceite de Pinus patula	87,9
Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo (2021)	Extractos de Sapindus saponaria	93,9
De La Cruz et al. (2023)	Estiércol +Aserrín	8,1
Ojeda-Morales et al. (2023)	Vermicomposta	86,0
Maddela et al. (2015)	Hongos autóctonos del suelo	79,9
Vargas et al. (2017)	Bacterias autóctonas del suelo	80,0
	Bacterias autóctonas del suelo	84,0
Raju et al. (2017)	Bacterias autóctonas del suelo	28,0
	Bacterias autóctonas del suelo	94,0
Bertel-Sevilla et al. (2018)	Bacterias autóctonas del suelo	81,5
Rodríguez-Campos et al. (2019)	Plantas autóctonas, lombrices autóctonas y bacterias autóctonas del suelo	86,4
Decesaro et al. (2021)	Bacterias autóctonas del suelo	57,3
Nobili et al. (2022)	Compost	10,9
	Vermicomposta	60,8

En la Tabla 2 se observa que la eficiencia de remoción estuvo en un rango entre 8,1% en un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo y tratado con estiércol+aserrín hasta 96,4% en un suelo contaminado con Gasolina y tratado con Extracto de cáscaras de *Citrus sinensis*. En promedio, para el uso de Bacterias autóctonas del suelo la eficiencia fue de 72,8% con un valor mínimo de 28,0% para un suelo contaminado con aceite automotriz y máximo de 94,0% para un suelo contaminado con diésel de petróleo.

En el caso del extracto de *Citrus sinensis* como el segundo agente remediador más utilizado, el promedio fue de 92,5% con un mínimo de 90,5% en un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo y máximo de 96,4% en un suelo contaminado con Gasolina. Lo anterior sugiere la influencia del tipo de hidrocarburo presente en el suelo contaminado en la eficiencia de remoción, en este caso la gasolina por estar compuesta por hidrocarburos más livianos (C₅ a C₁₁) es más fácil de remediar por los



microorganismos del suelo en presencia del agente remediador, lo que se puede sustentar en lo afirmado por Ossai et al. (2020) quienes indican que los compuestos de hidrocarburos del petróleo con una amplia gama de masas moleculares relativas y puntos de ebullición causan diversos grados de toxicidad al ambiente impactado, de allí que los efectos tóxicos de los compuestos y su biodisponibilidad para los sustratos dependen en gran medida de su composición química y estado físico. Se observan otros agentes biorremediadores con más de 90,0% de eficiencia de remoción de hidrocarburos, como lodos residuales con 93,0%, bacteria y levadura con 93,0%, extractos de *Sapindus saponaria* con 93,9% los tres sobre diésel de petróleo y el Lixiviado de la fibra de coco con 90,1% sobre hidrocarburos del petróleo. Por su parte el estiércol y el aserrín parecen no mostrar una buena eficiencia como biorremediadores, por el bajo porcentaje de remoción reportado (22,5% máximo), aunque en las investigaciones que los utilizaron (Buendía, 2012; de La Cruz et al., 2023) los autores han destacado su uso, parece que los números mostrados, en comparación con otros agentes biorremediadores, contradicen dichas conclusiones.

Para observar similitudes y diferencias entre los diferentes agentes biorremediadores utilizados en función a

su eficiencia de remoción se desarrolló un árbol de clasificación-regresión, el cual se muestra en la Fig. 7, asimismo se analizaron las similitudes y diferencias para los agentes contaminantes también en función a la eficiencia de remoción de los mismos lo que se muestra en la Tabla 3.

Se generan dos ramas principales de las que se derivan 7 ramas secundarias cada una con un grupo de agentes biorremediadores los cuales mantienen eficiencias dentro de un rango estadístico determinado con un nivel de confianza de 95,0%. Entre los biorremediadores de menor eficiencia se encuentran el Aserrín, el Compost y el Estiércol+Aserrín con eficiencias menores a 15,9%, el Estiércol+pleurotina y el Estiércol se ubican entre 15,9 y 62,4% de eficiencia, las Bacterias autóctonas y el Vermicomposta tienen eficiencias entre 62,4 y 77,9%. En la rama de valores mayores de eficiencia de remoción se visualizan 4 grupos, los Hongos autóctonos y Plantas+Lombrices+Bacterias con eficiencias entre 77,9 y 87,2%; el Aceite de pino y el Lixiviado de fibra de coco con eficiencias entre 87,2 y 91,3%; en solitario el Extracto de *Citrus sinensis* con eficiencias entre 91,3 y 92,8% y por último los agentes biorremediadores de mayor eficiencia, Bacterias+Levadura, Lodos residuales y Extracto de *Sapindus saponaria* con valores mayores a 92,8%.

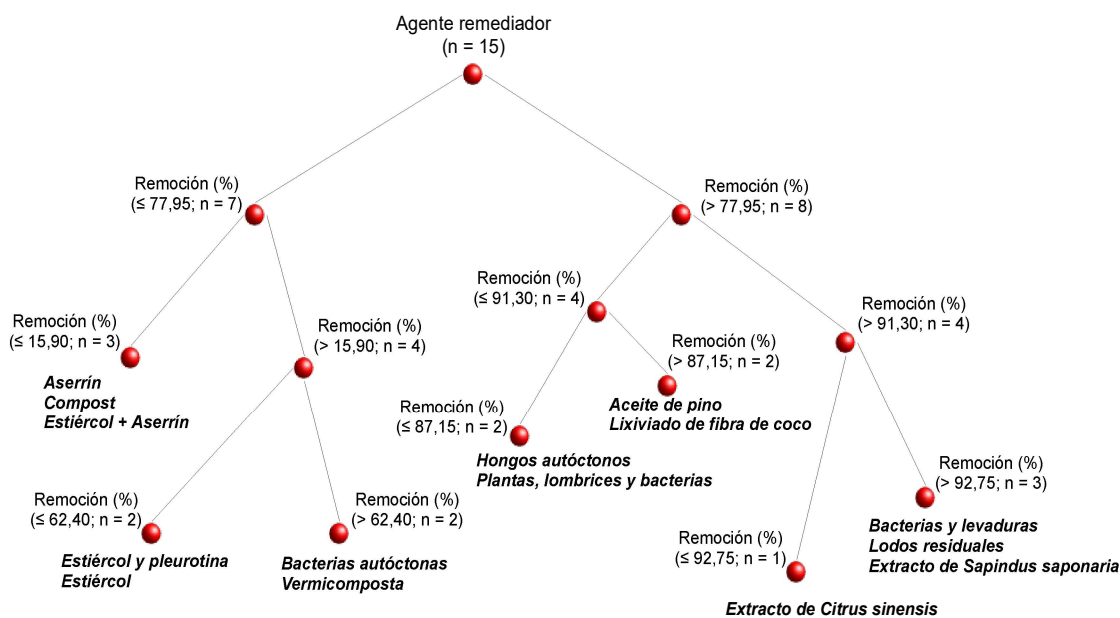


Figura 7. Agrupamiento de los agentes remediadores con base en el porcentaje de remoción, según el análisis de árbol de clasificación-regresión

Se observa que para obtener una mayor eficiencia de biorremediación de suelos impactados por hidrocarburos, los mejores tratamientos son los que involucran organismos autóctonos del suelo como bacterias y hongos, tal como los evidencian los resultados de los estudios revisados y lo corroboran estudios como el de Rodríguez-Gonzales et al. (2022) quienes indican que los hidrocarburos son eficientemente degradados por las bacterias tanto solas como en consorcios, sin embargo explican que su eficiencia

depende de factores como el tipo de hidrocarburo, la temperatura, la humedad y el pH. Sin embargo, como se detalla en la Tabla 3, un análisis de varianza ANOVA factorial demuestra que en el caso de los datos obtenidos de los estudios revisados, existe un efecto significativo del tipo de agente biorremediador ($p = 0,0164 < 0,05$) pero las eficiencias de remoción son independientes de los tipos de hidrocarburos contaminantes ($p = 0,2108 > 0,05$).

Tabla 3. Resultados de análisis de varianza (ANOVA) factorial

Factores	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	22413,96	18	1245,22	4,1	0,0237
Tipo de hidrocarburos contaminante	2258,37	4	564,59	1,86	0,2108
Tipo de agente biorremediador	20155,59	14	1439,69	4,75	0,0164
Error	2426,86	8	303,36		
Total	24840,82	26			

Fuente: elaboración propia

Se puede considerar entonces, con base en los análisis estadísticos sobre los datos secundarios que existe una diferencia significativa en la eficiencia de remoción de los hidrocarburos en función al agente remediador que se utilice, mas no así respecto al tipo de hidrocarburos que esté presente en el sustrato evaluado, por lo que sin importar las características de los contaminantes hidrocarburos, los tratamientos con microorganismos autóctonos y con la adición de complementos como los extractos vegetales, la biorremediación se erige como un tratamiento eficiente para la recuperación de suelos que han sido impactados negativamente con adición de hidrocarburos.

CONCLUSIONES

Durante el periodo 2010-2023 han sido limitados los estudios sobre la aplicación de biorremediación para disminuir el problema, destacándose México y Venezuela como los países con mayor número de investigaciones en esta temática. Es evidente el predominio de publicaciones en idioma español, como la lengua principal en la región y la tendencia a la publicación de las investigaciones en revistas de impacto regional, aunque también se observó una importante presencia de estudios en revistas de

impacto global. Se han utilizado 15 agentes biorremediadores entre los que destacan las Bacterias autóctonas del suelo y el Extracto de cáscaras de *Citrus sinensis*, así como 5 tipos de hidrocarburos contaminantes con predominancia de los estudios con suelos contaminados con petróleo y con diésel. Las eficiencias de biorremediación se encuentran entre 8,1 y 96,4% que corresponden al Estiércol+Aserrín y al Extracto de cáscaras de *Citrus sinensis* respectivamente. El análisis por árbol de clasificación-regresión indicó que los estudios se agrupan, con base en el promedio de eficiencia de remoción y los agentes biorremediadores utilizados, en 7 grupos donde los agentes de menor eficiencia fueron el Estiércol+Aserrín, el Aserrín y el Compost y los de mayor eficiencia las Bacterias+Levadura, los Lodos residuales y el Extracto de *Sapindus saponaria*. El análisis ANOVA demostró que la eficiencia de biorremediación en los estudios analizados es dependiente del tipo de agente remediador utilizado, no habiendo influencia del tipo de hidrocarburo contaminante, lo que indica que la biorremediación es eficiente sin importar el tipo de hidrocarburo que contamine el suelo, sino la acción de los microorganismos y las condiciones del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Adipah, S. (2019). Introduction of petroleum hydrocarbons contaminants and its human effects. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.26502/jesph.96120043>
- Bertel-Sevilla, A., Cervantes-Ceballos, L., Tirado-Ballestas, I., Maldonado-Rojas, W., Alzate-Restrepo, J., & Olivero-Verbel, J. (2020). Biodegradation of biodiesel-oil by *Cellulosimicrobium* sp. Isolated from Colombian Caribbean soils. *Environmental Technology*, 41(18), 2337-2349. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1564798>
- Buendía, H. (2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 15(30), 123-130. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v15i30.4101>

Canak, S., Berezljjev, L., Borojevic, K., Asotic, J., & Ketin, S. (2019). Bioremediation and "green chemistry". *Fresenius Environmental Bulletin*, 28, 3056-3064. <https://www.researchgate.net/profile/Sonja-Ketin/publication/332318816>

Cruz, H. G. A., Calleja, P. D. O., Herrera, R. G., Marín, A. R., Medinilla, E. E., Salinas, R. I. M., ... & Toledo, P. V. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. *Espacio I+ D, Innovación más desarrollo*, 5(12), 49-77. <https://doi.org/10.31644/IMASD.12.2016.a04>

De la Cruz, V. A., Huaman, O. C., Campos, C. C., Esteban, C. E. A., & Mendoza, V. R. R. (2023). Uso de estiércol y aserrín en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, Huancavelica, Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 785-801. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4430

Decesaro, A., Rempel, A., Machado, T. S., Cappellaro, Â. C., Machado, B. S., Cechin, I., ... & Colla, L. M. (2021). Bacterial biosurfactant increases ex situ biodiesel bioremediation in clayey soil. *Biodegradation*, 32, 389-401. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09944-z>

Gao, H., Wu, M., Liu, H., Xu, Y., & Liu, Z. (2022). Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. *Environmental Pollution*, 293, 118511. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511>

Hernández, D. Y. H., Ramos, D. P. L., & Flórez, D. T. (2020). Importancia de las revistas de acceso abierto: la indización como meta fundamental. *Dictamen Libre*, (26), 81-98. <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.26.6184>

Herrera-Franco, G., Montalván-Burbano, N., Mora-Frank, C., & Moreno-Alcívar, L. (2021). Research in Petroleum and Environment: A Bibliometric Analysis in South America. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, 16(6), 1109-1116. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160612>

Islas-García, A., Peralta-Rodríguez, M., Vega-Loyo, L., López-Aguilar, R., & Rodríguez-Vázquez, R. (2016). Biorremediación por bioestimulación y bioaumentación con microorganismos nativos de un suelo agrícola contaminado con hidrocarburos. *Biotecnología y Sustentabilidad*, 1(1), 82-85. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiaysust.v1i1.175>

Li, Y., Wang, Y., Khan, M. A., Luo, W., Xiang, Z., Xu, W., ... & Liu, D. (2021). Effect of plant extracts and citric acid on phytoremediation of metal-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111902. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111902>

Liu, B., Wu, C., Pan, P., Fu, Y., He, Z., Wu, L., & Li, Q. (2019). Remediation effectiveness of vermicompost for a potentially toxic metal-contaminated tropical acidic soil in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109394. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109394>

Luo, S., Zhen, Z., Zhu, X., Ren, L., Wu, W., Zhang, W., ... & Liang, Y. Q. (2021). Accelerated atrazine degradation and altered metabolic pathways in goat manure assisted soil bioremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221, 112432. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112432>

Maddela, N. R., Scalvenzi, L., Pérez, M., Montero, C., & Gooty, J. M. (2015). Efficiency of indigenous filamentous fungi for biodegradation of petroleum hydrocarbons in medium and soil: laboratory study from Ecuador. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95, 385-394. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1605-6>

- Marín-Velásquez, T., & Barrutia-Barreto, I. (2020). Extracto hidroalcohólico de cáscara de *Citrus sinensis* y aceite de *Pinus patula*, una alternativa de biorremediación. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11(2), 103-113. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2020.110200103>
- Marín, T. (2017). Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo. *Ingeniería*, 21(2), 1-10. <https://www.redalyc.org/journal/467/46753192001/html/>
- Marín, T. D. (2016). Crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Enfoque UTE*, 7(3), 1-13. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.101>
- Marín, T. D., & Arriojas, D. D. (2020). Efecto del extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja dulce (*Citrus sinensis*) en la remediación de una arena contaminado con gasolina. *Geominas*, 48(82), 61. <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A3%3A14464947/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A145122387&crl=c>
- Marín, T. D., & Arriojas, D. D. J. (2021). Efecto remediador de extractos de *Sapindus saponaria* sobre un suelo contaminado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 13-26. <https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1105>
- Marín, T. D., Gota, C. N., & Ortiz, T. C. (2018). Evaluación del extracto obtenido como lixiviado de fibra de coco *Cocos nucifera* como bioestimulante en la remediación de un suelo contaminado con petróleo. *Enfoque UTE*, 9(4), 180-193. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.303>
- Martínez-Prado, A., Pérez-López, M. E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A., & Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n3/v27n3a9.pdf>
- Medina, J., García, F., & Paricaguán, B. (2014). Biodegradación de petróleo por microorganismos autóctonos en suelos contaminados provenientes de la bahía de Amuay del Estado Falcón. *Revista ingeniería UC*, 21(1), 62-69. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732642007.pdf>
- Mohapatra, R. K., Srichandan, H., Mishra, S., & Parhi, P. K. (2019). Native soil bacteria: potential agent for bioremediation. In *Soil Microenvironment for Bioremediation and Polymer Production* (pp. 17-34). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119592129.ch2>
- Muñoz, Y. P., Martínez, S. L., Luna, A. R. R., & Arcos, S. A. R. (2019). Evaluación de impacto socioambiental, por derrame de petróleo de un ducto en Comalcalco, Tabasco. *Journal of Basic Sciences*, 5(15), 134-152. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
- Nápoles, J., Rodríguez, S., Santiago, L., & Ábalos, A. (2015). Disminución del extracto orgánico total en suelos contaminados con hidrocarburos. *Tecnología Química*, 35(3), 322-333. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n3/rtq06315.pdf>
- Nobili, S., Masin, C. E., Zalazar, C. S., & Lescano, M. R. (2022). Bioremediation of hydrocarbon contaminated soil using local organic materials and earthworms. *Environmental Pollution*, 314, 120169. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120169>
- Ojeda-Morales, M. E., Córdova-Bautista, Y., Álvarez-Ramírez, J. G., López-Lázaro, J. D. L. S., Martínez-Pereyra, G., & Morales-Bautista, C. M. (2023). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando sustancias húmicas de vermicomposta. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-18. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1656>

Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>

OVDHA. (2022). Derrames petroleros en Venezuela (2016 – 2021). Observatorio Venezolano de Derechos Humanos Ambientales. <https://humvenezuela.com/wp-content/uploads/2022/04/Informe-Derrames-2016-2021-final20322-2.pdf>

Plaza, L. M., Granadino, B., García-Carpintero, E., Albornoz, M., Barrere, R., & Matas, L. (2018). El valor del idioma español en ciencia y tecnología. *Rilce. Revista de Filología Hispánica*, 34(2), 716-45. <https://doi.org/10.15581/008.34.2.716-45>

Raju, M. N., Leo, R., Herminia, S. S., Morán, R. E. B., Venkateswarlu, K., & Laura, S. (2017). Biodegradation of diesel, crude oil and spent lubricating oil by soil isolates of *Bacillus* spp. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 98, 698-705. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2039-0>

Rodríguez-Campos, J., Perales-García, A., Hernández-Carballo, J., Martínez-Rabelo, F., Hernández-Castellanos, B., Barois, I., & Contreras-Ramos, S. M. (2019). Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *Journal of soils and sediments*, 19, 1981-1994. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2213-y>

Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 178-208. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.56/1.9>

Salatino, M. (2019). Circuitos locales en contextos globales de circulación. Una aproximación a las revistas científicas argentinas. *Palabra clave*, 9(1), 73-73. <http://www.scielo.org.ar/pdf/pacla/v9n1/1853-9912-pacla-9-1-e073.pdf>

Vargas, J. P., Carmona, S. E. V., Moreno, E. Z., Casado, N. A. R., & Calva, G. C. (2017). Bioremediation of soils from oil spill impacted sites using bioaugmentation with biosurfactants producing, native, free-living nitrogen fixing bacteria. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 105-114. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.09>

Vizueté-García, R. A., Pascual-Barrera, A. E., Taco-Taco, C. W., & Morales-Padilla, M. M. (2020). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. *Revista Lasallista de Investigación*, 17(1), 177-187. <https://doi.org/10.22507/ri.v17n1a19>