



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tecnologías Físicas y Biológica en la Remediación de Suelos
Contaminados de PHs con un Enfoque Ecológico y Sostenible:
Revisión sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES:

Cuya Flores, Jhoset Junior (ORCID: 0000-0001-9155-8816)
Varda Mayer, Carlos Alexander (ORCID: 0000-0002-4520-0044)

ASESOR:

Mg. Honores Balcazar, César Francisco (ORCID: 0000-0003-3202-1327)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Sistema de Gestión Ambiental

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A Dios con mucho amor y gratitud, por haberme dado como abuelita a Mi Mamá Pelusa, quien es un ángel en mi vida y ejemplo de honestidad, perseverancia, sabiduría y deseos de superación, a quien debo lo que soy.

Varda Mayer, Carlos Alexander

DEDICATORIA

A Dios por permitirme la vida, poder afrontar nuevos retos saliendo airoso de ellos y ser una persona de éxito.

A mi querida madre: MARIA FLORES PAREJA que, con su esfuerzo, dedicación, sacrificio y gran amor hizo posible mi formación profesional en esta hermosa carrera.

A mi querida familia, en especial a mi mamita VICTORIA PAREJA ONTON que se encuentra guiándome y cuidándome desde el cielo.

A mi papito ISMAEL FLORES TAYPE por su apoyo Incondicional durante mi vida en este camino de aprendizaje constante.

Cuya Flores, Jhoset Junior

AGRADECIMIENTOS

A mi abuelita MARÍA TERESA, por haber estado en los momentos más importantes de mi vida.

A mis padres, por haberme dado la vida.

A mi novia y amiga, Katy, por el apoyo, el amor y los aportes en el desarrollo de mi tesis y en mi vida.

A mis compañeros de clase durante los niveles de Universidad, sobre todo a Jhoset Cuya, por su perseverancia y dedicación para realizar este trabajo de tesis.

A mis docentes, quienes me brindaron sus conocimientos y su apoyo en clases y a la Facultad de Ingeniería por abrirme sus puertas y permitirme ser parte de ella, hoy y siempre.

Varda Mayer, Carlos Alexander

AGRADECIMIENTOS

A mi madre MARIA FLORES PAREJA por el apoyo incondicional en este largo caminar.

A mi amigo y colega Carlos Varda Mayer por permitirme elaborar esta tesis al lado suyo afrontando y superándolo diversas dificultades.

A la Universidad César Vallejo por la oportunidad que me brindaron en la realización de mi tesis.

Y a todos mis amigos que me apoyaron durante el proceso de elaboración de mi tesis final.

Cuya Flores, Jhoset Junior

Índice de contenido

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras.....	vi
Índice de gráficos	vii
Índice de abreviaturas	viii
Resumen.....	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación	15
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	15
3.3. Escenario de estudio.....	16
3.4. Participantes	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	16
3.6. Procedimiento	16
3.7. Rigor científico	18
3.8. Método de análisis de información	19
3.9. Aspectos éticos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS.....	32
ANEXOS	

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Tecnología más usada en el tratamiento biológico</i>	20
<i>Tabla 2. Tecnología más usada en el tratamiento físico</i>	21
<i>Tabla 3. Tasa de eliminación porcentual de los tratamientos biológicos</i>	24
<i>Tabla 4. Tasa de eliminación porcentual de los tratamientos físicos</i>	26
<i>Tabla 5. Efectos de hidrocarburos de petróleo en el medio ambiente y salud humana</i>	28

Índice de figuras

<i>Figura 1. Fuente de contaminación del suelo por PHs</i> -----	4
<i>Figura 2. Factores que inciden en la biodegradación de hidrocarburos de petróleo</i> -----	7
<i>Figura 3. Tasas de degradación de hidrocarburos en suelos, agua dulce y ambientes marinos</i> -----	8

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Categorías de los PHs</i> -----	5
<i>Gráfico 2. Clasificación de métodos físicos en suelos contaminados con PHs</i> -----	9
<i>Gráfico 3. Clasificación de métodos biológicos para remediación de PHs</i> -----	9
<i>Gráfico 4. Procedimiento de estudio</i> -----	17
<i>Gráfico 5. Promedio porcentual de los tratamientos biológicos</i> -----	25
<i>Gráfico 6. Promedio porcentual de los tratamientos físicos</i> -----	27

Índice de abreviaturas

PHs	: hidrocarburos de petróleo
PH	: hidrocarburo de petróleo
MMT	: millones de toneladas métricas
BTEX	: benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
PAH	: hidrocarburos poliaromáticos

Resumen

El presente trabajo de investigación presentó como objetivo identificar cuáles son las tecnologías de remediación de suelos contaminados de PHs con un enfoque ecológico y sostenible, para lo cual implementó una metodología de tipo aplicada con un diseño sistemático. Mediante la técnica de análisis documental se seleccionaron 22 artículos al estudio.

Mediante los resultados se obtuvo, que la técnica física es más las usada, y aunque la técnica biológica también presentó una cantidad de estudios significativos y presentando a diferencia de las técnicas físicas un enfoque ecológico y sostenible. Así mismo, entre la técnica biológica el tratamiento de biorremediación empleando bacterias y hongos fue la más usada. Además, se define que el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología presenta un promedio alto para los tratamientos biológicos con un 80 a 90% y una tasa de eliminación media para los tratamientos físicos, presentando un porcentaje del 40 al 80%. Por último, al analizar los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminado, se tiene que los efectos que más se presentan por la contaminación de los PHs en el medio ambiente son en suelos agrícolas y en la vegetación.

Palabras clave: física, biológica, remediación, suelo, hidrocarburo.

Abstract

The objective of this research work was to identify which are the remediation technologies for PH contaminated soils with an ecological and sustainable approach, for which it implemented an applied methodology with a systematic design. By means of the documentary analysis technique, 22 articles were selected for the study.

The results showed that the physical technique is the most used, although the biological technique also presented a significant number of studies and, unlike the physical techniques, it presents an ecological and sustainable approach. Likewise, among the biological technique, the bioremediation treatment using bacteria and fungi was the most used. In addition, it is defined that the average percentage elimination rate of each technology presents a high average for biological treatments with 80 to 90% and an average elimination rate for physical treatments, presenting a percentage of 40 to 80%. Finally, when analyzing the effects of PHs on the environment and human health caused by contaminated soils, the most common effects of PH contamination in the environment are on agricultural soils and vegetation.

Keywords: physical, biological, remediation, soil, hydrocarbon.

I. INTRODUCCIÓN

El petróleo es una fuente importante de energía e ingresos para muchos países en la actualidad, y su producción ha sido descrita como una de las actividades industriales más importantes del siglo XXI (Song Xiaowei et al., 2021, p.2). Desde finales de la década de 1850, cuando Edwin Drake perforó el primer pozo de petróleo, la demanda de petróleo ha seguido aumentando (Varjani Sunita J., 2017, p.1).

Además, se estima que el consumo mundial diario de petróleo aumentaría de 85 millones de barriles en 2006 a 106,6 millones de barriles en 2030 (Wang Yaxin et al., 2022, p.2). Pero, a pesar de su importancia, el petróleo se produce con grandes volúmenes de desechos, y las aguas residuales representan más del 80 % de los desechos líquidos y hasta el 95 % en yacimientos petrolíferos envejecidos, donde, generalmente, la relación de volumen de aceite/agua es de 1:3 (Wang Ao et al., 2022, p.3).

Ante ello, aunque los hidrocarburos de petróleo (PHs) se utilizan como materia prima en muchas industrias y fuentes de energía primaria los PH excesivos actúan como contaminantes del suelo, lo que representa una grave amenaza para los organismos vivos (Green Danielle S. et al., 2017, p.1). Los PHs son compuestos recalcitrantes y se clasifican como contaminantes prioritarios y la limpieza de estos contaminantes del medio ambiente es un problema del mundo real (Al Hawash A. et al., 2018, p.1).

Según el Boletín de la Situación del Medio Ambiente Marino de China de 2017, publicado por la Administración Estatal de Océanos, aproximadamente 5 104 t de contaminantes a base de petróleo fluyeron hacia el océano con los ríos a lo largo del año (Xiong D. et al., 2022, p.2). Así también, a nivel de Latinoamérica los derrames de hidrocarburos asociados al robo de combustible son comunes lo que genera que el suelo que rodea estos derrames quede inservible debido a la contaminación por hidrocarburos (Arroyo S. et al., 2021, p.1).

Los efectos de los diferentes niveles de contaminación por petróleo recaen en las comunidades microbianas del suelo y las funciones ecológicas (Gao Huan et al., 2022, p.2). Además, provoca cambios drásticos en las propiedades microbiológicas, químicas y físicas del suelo, donde el suelo que rodea estos derrames queda

inservible debido a la contaminación por hidrocarburos (Chen Yun An et al., 2020, p.3).

El suelo contaminado con petróleo aparte de producir problemas ecológicos representa un peligro para la salud humana (Jabbar Noor M. et al., 2022, p.1).

Ante lo expuesto, la biorremediación es un método ecológico para degradar los PHs, específicamente mediante el uso de microorganismos (Gao Huan et al., 2022, p.2). Así también, a nivel mundial se han reportado varios métodos de tratamiento físico para degradar y remover hidrocarburos de petróleo de suelos contaminados (Wartell B. et al., 2021, p.3).

Ante los amplios métodos encontrados se tiene la necesidad de revisar varias tecnologías de remediación; por lo cual se genera la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las tecnologías de remediación de suelos contaminados de PHs con un enfoque ecológico y sostenible?

Ante ello, se elaboraron las siguientes preguntas específicas para el desarrollo del problema general de estudio:

PE1. ¿Cuáles son las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs?

PE2. ¿Cuál es el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs?

PE3. ¿Cuáles son los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminados?

Así mismo, se planteó el siguiente objetivo de estudio: Identificar cuáles son las tecnologías de remediación de suelos contaminados de PHs con un enfoque ecológico y sostenible.

Como objetivos específicos se elaboraron:

OE1. Clasificar las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs

OE2. Definir el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs

OE3. Analizar cuáles son los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminados

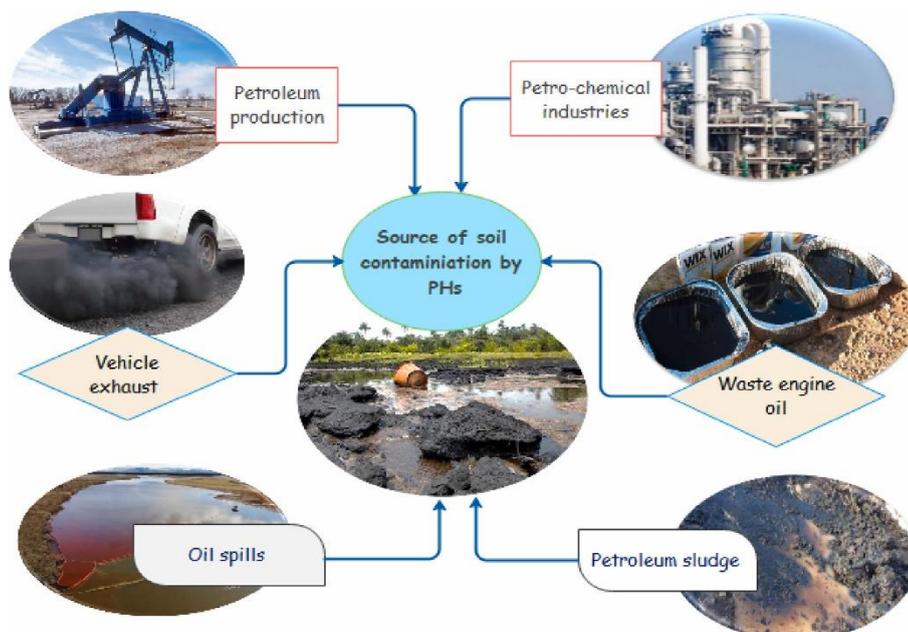
En el presente estudio se realizará la revisión y análisis de diversas literaturas a nivel mundial para identificar la tecnología de remediación de suelos contaminados con PHs que presente un mayor enfoque ecológico y sostenible; por lo cual la justificación que se presenta es teórica. Siendo además este trabajo, dirigido a los profesionales competentes del campo y a futuros investigadores que busquen ahondar y ampliar en el tema; esperando encontrar procesos que tengan efectos negativos mínimos en el medio ambiente porque la biorremediación es un proceso natural, ya que, los sistemas de biorremediación, cuando se usan adecuadamente, solo tienen efectos menores y de corto plazo.

II. MARCO TEÓRICO

El hidrocarburo de petróleo (PH) se consideran la principal fuente de energía y materiales para diferentes industrias (Chen Zhong et al., 2020, p.2). Pero, existen muchas amenazas en el medio ambiente cuando los PH se utilizan como fuentes de energía (Soares Angelo A. et al., 2017, p.2). Ante ello, los PH son los principales contaminantes ambientales generados por la producción a gran escala, el transporte, el refinado de petróleo costero, las actividades de transporte marítimo, la producción de petróleo en alta mar y los derrames accidentales (Sakshi S. y Haritash A., 2020, p.4).

Naturalmente, los PH son los combustibles fósiles más explotados comercialmente, sin embargo, según la Agencia de Protección Ambiental (2005), las fugas accidentales de petroleros y gaseros durante la carga, el transporte, el almacenamiento y la distribución, o en forma de derrames de petróleo, pueden contaminar el medio ambiente (Liu Yuqin et al., 2022, p.3). Anualmente, se descargan al medio ambiente entre 1,7 y 8,8 millones de toneladas métricas (MMT) de PH, casi el 90 % relacionado con actividades humanas, además, pueden tener un impacto negativo en la vida acuática y terrestre (Gao Huan et al., 2022, p.2). Ante ello se presenta en la figura 1 las rutas principales por la cual los PH penetran y contaminan el suelo.

Figura N°1. Fuente de contaminación del suelo por PHs



Fuente: Extraído de Haque Shafiul et al., 2022

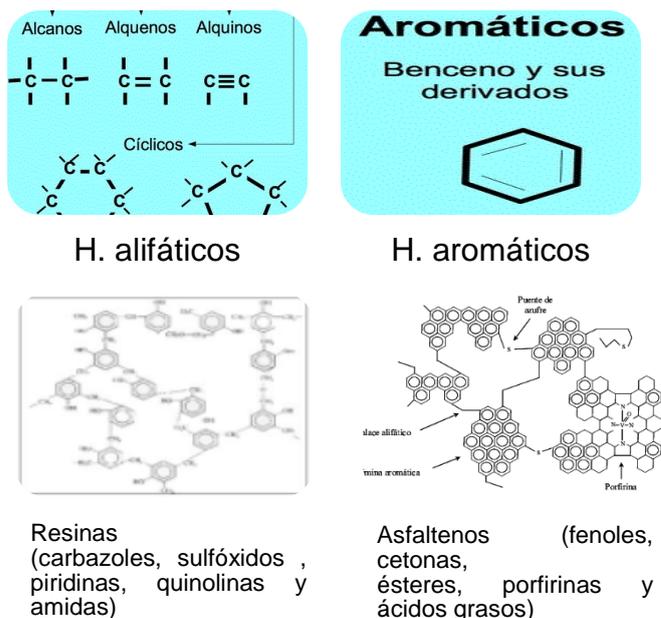
Como se muestra en la figura 1 las actividades humanas, como las escorrentías municipales y la liberación de líquidos e industriales, causan contaminación por PH que impacta el medio ambiente y representa un peligro directo o indirecto para la salud de las formas de vida.

Cabe señalar que, los componentes del aceite dispersos y disueltos son una mezcla de hidrocarburos que incluyen BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), PAH (hidrocarburos poliaromáticos) y fenoles (Stirling G. et al., 2016, p.7). Los aceites disueltos son los compuestos orgánicos constituyentes polares en el agua producida, mientras que las pequeñas gotas de aceite suspendidas en la fase acuosa se denominan aceite disperso (Jabbar Noor M. et al., 2022, p.1).

BTEX, fenoles, hidrocarburos alifáticos, ácido carboxílico y compuestos aromáticos de bajo peso molecular se clasifican como aceite disuelto, mientras que los PAH menos solubles y los alquilfenoles pesados están presentes en el agua producida como aceite disperso (Wartell B. et al., 2021, p.3).

Los PAHs son compuestos de anillos aromáticos fusionados que se encuentran en la atmósfera y son relativamente resistentes a la biodegradación; como tales, se acumulan en niveles significativos en el medio ambiente. Los PHs se dividen en cuatro categorías como se muestra en el gráfico 1.

Gráfico N°1. Categorías de los PHs



Elaboración propia

Como problema de los PAHs, el contenido de petróleo disuelto y disperso en el agua producida es peligroso para el medio ambiente y su concentración puede ser muy alta en algunos campos petroleros (Raja Pitchaikaran et al., 2022, p.2). La cantidad de petróleo presente en el agua producida se rige por una serie de factores complejos pero interrelacionados (wei Kun Hao et al., 2022, p.3).

Así también, el efecto de los hidrocarburos de petróleo en el medio ambiente y el suelo depende de las características químicas y físicas y de los diversos componentes de los hidrocarburos, afectando principalmente las propiedades del suelo a través de la adsorción, la biodegradación y la lixiviación (Logeshwaran P. et al., 2018, p.2).

Se ha informado que la liberación de hidrocarburos de petróleo en la capa superficial y el subsuelo destruye la textura y la estructura del suelo y reduce los espacios porosos y satura la conductividad hidráulica (Hou J., et al., 2021, p.3)

Los hidrocarburos alifáticos y aromáticos son dos de los principales componentes del PHs que han sido reportados por ser recalcitrantes y nocivos para la salud (Bolade O. et al., 2021, p.5). Los hidrocarburos alifáticos se degradan fácilmente por los microorganismos, pero las cadenas alifáticas ramificadas grandes no se degradan fácilmente; por lo tanto, persisten en el ambiente, por lo cual, los hidrocarburos aromáticos son difíciles de degradar debido a sus estructuras complejas (Steliga T. y Kluk D., 2020, p.2).

Además, los experimentos in vitro e in vivo han demostrado que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son cancerígenos, citotóxicos, genotóxicos y tóxicos para el medio ambiente (Abbasian F. et al., 2016, p.2).

Los hidrocarburos de petróleo (PHs) son uno de los contaminantes orgánicos más prevalentes y dañinos en los ambientes marinos, ya que, se introducen en el medio marino principalmente por los vertidos de aguas residuales oleosas y los derrames de petróleo en el mar (Acharya P. et al., 2022, p.3).

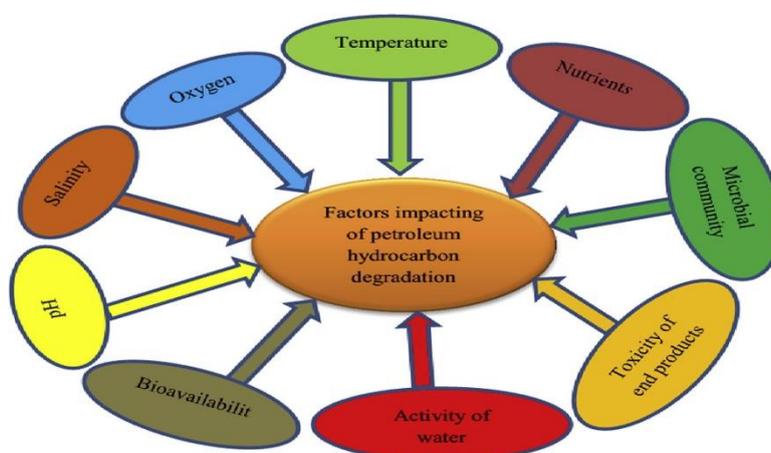
Además, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), uno de los principales componentes de los PH, presentan toxicidad, bioacumulación, semivolatilidad y persistencia en el medio ambiente y están catalogados como contaminantes orgánicos persistentes (Asejeje G. et al., 2021, p.2). En los medios acuáticos, los PHs

forman una película de aceite en la superficie, lo que interrumpe el proceso de reoxigenación, afectando así a la calidad del agua y a los organismos presentes en ella (Balint A., 2021, p.3).

Ante lo expuesto, numerosos estudios han reportado que diferentes factores ambientales influyen en la biodegradación de los PHs, donde la disponibilidad limitada de microorganismos en el medio ambiente es uno de los factores más importantes que restringen la biodegradabilidad de los contaminantes del petróleo (Chokor A., 2021, p.4). La biorremediación de sitios contaminados con petróleo crudo a menudo está limitada debido a la escasa biodiversidad de microbios locales o la escasez de microbios locales especializados con propiedades de sustrato suplementarias necesarias para la degradación de varios hidrocarburos presentes en sitios contaminados (Bojan O. et al., 2021, p.2).

Así mismo, mediante la figura 2 se muestra los factores que inciden en la biodegradación de hidrocarburos de petróleo.

Figura N°2. Factores que inciden en la biodegradación de hidrocarburos de petróleo



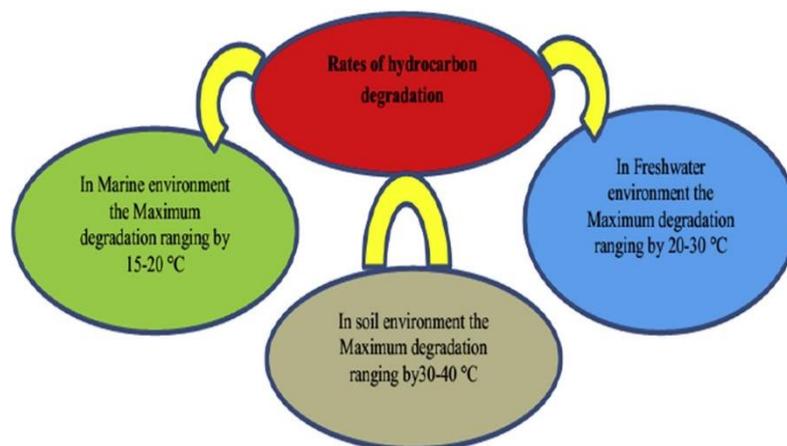
Fuente: Extraído de Varjani Sunita J., 2017

La temperatura es uno de los factores que influyen en la biodegradación del PH al afectar las composiciones físicas y químicas de los PH (Bisht Sandeep et al., 2016, p.3). A bajas temperaturas, generalmente se observa que la tasa de degradación disminuye, lo que se cree que es el resultado de tasas de actividad enzimática reducidas (Lee H. et al., 2016, p.2).

A pesar de que la biodegradación de los hidrocarburos puede tener lugar en un amplio dominio de temperaturas, la tasa de degradación disminuye al disminuir la

temperatura (Meng Long et al., 2017, p.1). Las tasas más altas de degradación que ocurrieron en el rango de temperatura de 30 a 40 °C, 20 a 30 °C y 15 a 20 °C en el suelo, ambientes marinos y de agua dulce, respectivamente. Ver figura 3.

Figura N°3. Tasas de degradación de hidrocarburos en suelos, agua dulce y ambientes marinos



Fuente: Extraído de Gao Huan et al., 2022

La disponibilidad de oxígeno en el suelo depende de las tasas de consumo de oxígeno microbiano y el tipo de suelo, si el suelo está saturado de agua y la presencia de sustratos utilizables que pueden conducir al agotamiento del oxígeno (Ebadi ali et al., 2017, p.2).

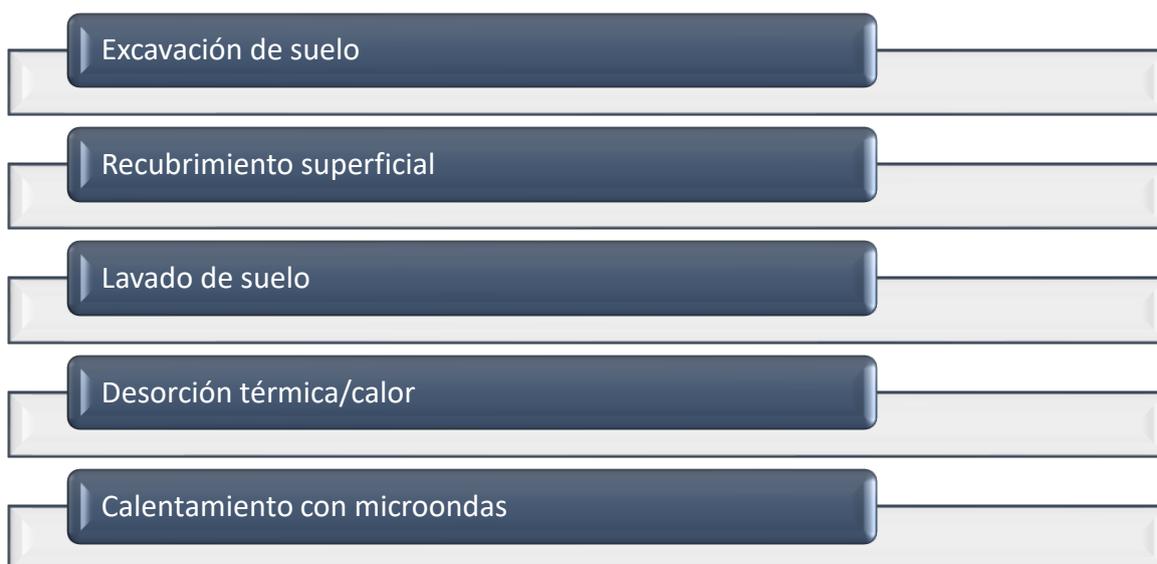
En este contexto, varias tecnologías físicas, químicas, biológicas y otras equivalentes pueden ser aplicados mediante un enfoque sostenible para reducir los principales riesgos de suelos contaminados con hidrocarburos tóxicos del petróleo (Ossai Innocent C. et al., 2020, p.1).

Entre los diversos métodos físicos están los que incluyen métodos de separación y reciclaje, es decir, lavado de suelo, lavado de suelo, solidificación, vitrificación, estabilización, desorción térmica, incineración y extracción de vapor (Kuppusamy S. et al., 2017, p.3). Como se muestra en el grafico 2.

En los suelos contaminados con petróleo la recuperación y descontaminación se da por dos métodos; *in situ* y/o *ex situ*. el tratamiento *in situ* con la adición de productos químicos y/o microorganismos, y la retirada con tratamiento posterior mediante el uso de procesos físicos, químicos o biológicos (Harwood A. y Nutile S., 2022, p.2).

Por otro lado, el método ex situ se practica fuera del sitio, como el uso de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales en un laboratorio o acuario y se llevan a cabo fuera del sitio mediante excavación, desintoxicación, tecnología de destrucción y se pueden aplicar para eliminar los hidrocarburos de petróleo del suelo (Abdelhafeez I. et al., 2022, p.2).

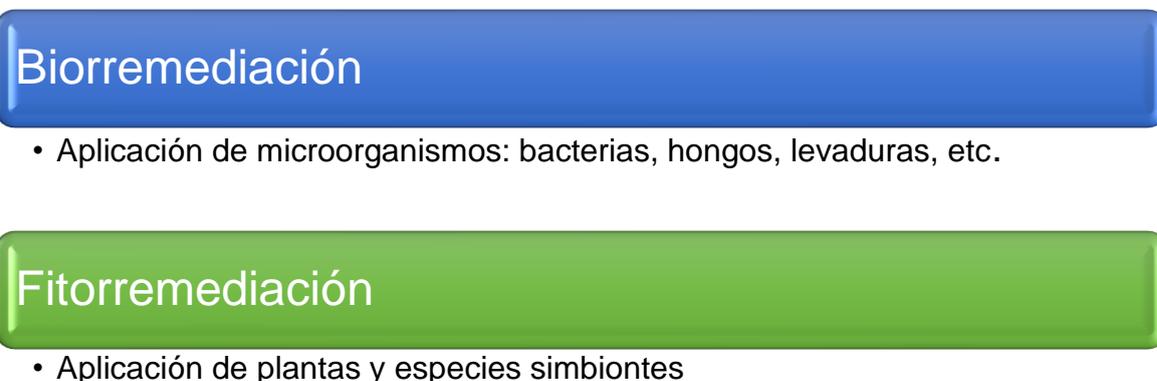
Gráfico N°2. Clasificación de métodos físicos en suelos contaminados con PHs



Elaboración propia

Por otro lado, algunos estudios han indicado que la degradación anaeróbica de los PH por parte de los microorganismos puede ocurrir a tasas insignificantes (Zhang Jun Hui, et al., 2016, p.2). Siendo los métodos biológicos para la remoción de hidrocarburos de petróleo agrupados como se muestra en el gráfico 3.

Gráfico N°3. Clasificación de métodos biológicos para remediación de PHs



Elaboración propia

Como se ha confirmado en estudios recientes, los consorcios microbianos de lodo y suelo han sido capaces de metabolizar compuestos aromáticos sustituidos con alquilo y no sustituidos por benceno, 1,3-dimetilbenceno y acenafteno, naftaleno, tolueno y xileno, en ausencia de oxígeno molecular (Ambaye T. et al., 2021, p.2).

Las bacterias, levaduras, hongos y algunas algas pueden degradar los PH, siendo uno de los principales factores que afectan la degradación de los PHs es la disponibilidad de microorganismos que pueden catabolizar los contaminantes (Al Hawash A. et al., 2018, p.3).

Además, las bacterias y también los hongos contribuyen a la degradación de los hidrocarburos en el suelo (Bezerra K. et al., 2018, p.2). Ya que, los microorganismos utilizan los PH como fuentes de alimento que se pueden encontrar fácilmente en enormes cantidades cerca de lugares expuestos a la contaminación por petróleo, como filtraciones de petróleo crudo, rutas de navegación, puertos, yacimientos petrolíferos, gasolineras y otras instalaciones similares (Sun S. et al., 2019, p.3).

A partir de lo explicado se presentan algunos antecedentes de estudios relacionados con el tema a nivel mundial:

Zhang Jun Hui et al., (2016, p.1), en su estudio evaluó la eficiencia de las enzimas extracelulares fúngicas para la degradación del petróleo crudo y su viabilidad para su uso en la recuperación mejorada de petróleo. Donde, seis cultivos fúngicos de *Aspergillus* spp. fueron aislados de muestras de suelo superficial contaminadas con petróleo de un yacimiento petrolífero. Se investigó el desempeño de las enzimas extracelulares fúngicas para degradar el petróleo crudo utilizando preparaciones de enzimas sólidas. Todas las preparaciones enzimáticas degradaron eficientemente el alcano, las resinas aromáticas, los asfaltenos y redujeron la viscosidad del petróleo crudo en diversos grados (máx. 59,0%). La degradación enzimática del petróleo crudo estuvo acompañada por la producción dinámica de gases (CO_2 y H_2) y ácidos orgánicos (oxalato y propionato). Además, las preparaciones enzimáticas eliminaron entre el 83,40 y el 87,78 % del petróleo crudo adsorbido en el papel de filtro.

Al Hawash A. et al., (2018, p.1), en su trabajo aplicó cuatro cepas de hongos que degradan el petróleo crudo aislándolos en un área contaminada con petróleo en el campo petrolero de Rumaila. La secuenciación ITS y el análisis de características

morfológicas y bioquímicas identificaron estas cepas como *Penicillium* sp. RMA1 y RMA2. El análisis gravimétrico y por cromatografía de gases del aceite crudo remanente en el medio de cultivo después de 14 días de incubación a 30 °C mostró que RMA1 y RMA2 degradaron el aceite crudo en un 57% y 55%, respectivamente. Estas cepas redujeron la tensión superficial cuando se cultivaron en petróleo crudo (1 % v/v) y exhibieron una hidrofobicidad de la superficie celular de más del 70 %. Estos resultados sugirieron que RMA1 y RMA2 realizaron una actividad efectiva de degradación de petróleo crudo y emulsificación de petróleo crudo.

Ruley Jane A. et al., (2020, p.2), tiene como objetivo de estudio caracterizar las comunidades de rizobacterias predominantes en especies fitorremediadoras que crecen en suelos contaminados con hidrocarburos bioestimulados con estiércol de ganado. Los tratamientos estudiados fueron solo especies vegetales (T1), especies vegetales e hidrocarburos (T2), especies vegetales y estiércol (T3), y especies vegetales, estiércol e hidrocarburos (T4). Las comunidades de rizobacterias se determinaron mediante pirosecuenciación de ARNr 16S. En el tratamiento con especies fitorremediadoras, hidrocarburos 75 g · kg⁻¹ suelo, y estiércol de ganado 5 g · kg⁻¹ suelo (T4), hubo un aumento significativo () en abundancia de rizobacterias con el ASV más alto observado en *H. rufa* (4980) y el más bajo en *S. arundinaceum* (3955). En el mismo tratamiento, la diversidad de la comunidad de bacterias fue alta en *H. rufa* (Chao1, 10310) y mínima en *S. arundinaceum* (Chao 1, 8260) con Proteobacteria, Firmicutes y Actinobacteria como filos dominantes.

Alsayegh S. et al., (2021, p.2), en su trabajo, para mejorar el proceso de remediación bacteriana de los hidrocarburos meteorizados, se consideró el área de Dukhan, Qatar, como modelo para los procesos de meteorización. La autopurificación por bacterias autóctonas degradadoras de hidrocarburos mostró un rendimiento bajo. Donde los resultados muestran que, la bioestimulación/siembra usando una u otra de las bacterias autóctonas mejoró el rendimiento. Simbiosis entre tres cepas que dominan el suelo; *Bacillus sorensis* D11, *Bacillus cereus* D12 y *Pseudomonas stutzeri* D13, tuvo un alto rendimiento para la eliminación de hidrocarburos de petróleo totales en el suelo erosionado. D11, el más sensible, mostró el mayor rendimiento cuando se mezcló con D12 o D13. D12, con menos rendimiento que D11, fue más activo en la gama de compuestos orgánicos diésel (DRO: C10-C28), similar a D11. D13 mostró un comportamiento metabólico cercano a los comensales y cometabólicos. Fue más

activo en hidrocarburos por encima de C29. La combinación de las tres cepas condujo a la eliminación de al menos el 80% de compuestos orgánicos C10-C35 en el extracto a concentraciones de 31,1 mg/g TPH-DRO.

Ramadass K. et al., (2018, p.1), en su estudio utilizó dos cepas de *Pseudomonas*, *P. putida* TPK-1 y *P. aeruginosa* TPK-4, en estrategias de biorremediación, a saber, atenuación natural, bioestimulación y bioaumento, para la eliminación de hidrocarburos de petróleo totales degradados (TPH) en suelo contaminado a largo plazo con altas concentraciones de aceite de motor (39 000–41 000 mg TPH kg⁻¹suelo). Ambas cepas bacterianas exhibieron un gran potencial para remediar los hidrocarburos degradados del aceite de motor. Adición de fertilizantes inorgánicos(NPK), a los niveles recomendados para la biorremediación, resultó en una inhibición significativa en la bioestimulación/atenuación natural mejorada, así como en la bioaugmentación. Los datos sobre la actividad de la deshidrogenasa confirmaron claramente los de las estrategias de biorremediación utilizadas, lo que indica que este ensayo enzimático podría servir como indicador del potencial de biorremediación del suelo contaminado con petróleo. Concluyendo que la extracción de TPH del suelo contaminado con aceite de motor con hidroxipropil-β-ciclodextrina (HPCD), pero no con 1-butanol, resultó confiable para predecir la biodisponibilidad de los hidrocarburos degradados.

Bolade Oladotun P. et al., (2021, p.1), en su trabajo se desarrolló un enfoque quimiométrico para optimizar las condiciones para la degradación de TPH utilizando un diseño compuesto central (CCD). Donde, las nanopartículas biogénicas de óxido de hierro sintetizadas a partir de una planta fácilmente disponible de origen local, *Azadirachta indica*, se usaron sinérgicamente con persulfato de sodio (PS) para degradar los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en el suelo contaminado. La caracterización de las nanopartículas de óxido de hierro se llevó a cabo con difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de transmisión(TEM), microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) y difracción de área de electrones seleccionados (SAED). El análisis de TPH se llevó a cabo con detector de ionización de llama de cromatografía de gases (GC-FID). La condición óptima para la degradación completa de TPH se logró con un pH de 6,0 y una dosis de oxidante

de 0,74 M en 14 h y 5 días. Los resultados mostraron que, bajo condiciones optimizadas, PS solo degradó 68% TPH mientras que 0.07 y 0.15 g/L FeNP lograron ~93 y 95% de degradación, respectivamente. Además, 0,07 y 0,15 g/L de PS activado por FeNP lograron ~99 y 100% de degradación de TPH, respectivamente.

Xia Chunqing et al., (2022, p.1), en su estudio investigó la degradación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y los n-alcanos en el suelo mediante FeS@BC y persulfato activado (PS) de FeS. Se examinaron varios factores de control, incluida la proporción de masa de FeS a biocarbón (BC), la dosis de PS, la dosis de FeS@BC y el pH inicial. Los parámetros óptimos se obtuvieron mediante experimentos de un solo factor. En condiciones óptimas, las tasas de eliminación de TPH, PAH y n-alcanos por un sistema FeS@BC/PS fueron 61,83 %, 78,17 % y 91,56 %, respectivamente, que fueron mucho más altas que las de un sistema FeS/PS (47,91 %, 51,20 % y 79,31 %, respectivamente). SO_4^{2-} producido por PS durante la activación. Con base en la caracterización y análisis de datos, se propone un posible mecanismo de activación: la reducción de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ y la activación de BC como mediador de transferencia de electrones promueven la generación de SO_4^{2-} .

Murgueitio E. et al., (2018, p.1), produjo en su estudio nanopartículas de hierro a partir del extracto de mortiño (*Vaccinium floribundum*) (vZVI) como agente reductor y estabilizador. Las nanopartículas frescas se caracterizaron mediante técnicas TEM, XRD y FTIR, mientras que se realizaron experimentos de laboratorio para evaluar la eliminación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) del agua y el suelo después del tratamiento con partículas de hierro sintetizadas a nanoescala. Las nanopartículas producidas eran esféricas en el rango de 5 a 10 nm. Luego del tratamiento con nanopartículas vZVI, el agua contaminada con dos concentraciones de TPHs (9.32 mg/L y 94.20 mg/L) mostró remociones de 85.94% y 88.34%, respectivamente, mientras que un suelo contaminado con una concentración de TPHs de 5000 mg/kg tratado durante A las 32 h con nanopartículas se alcanzó una remoción del 81,90%. Los resultados indican que la adición de nanopartículas de vZVI produjo fuertes condiciones reductoras,

Desalegn Biruck et al., (2018, p.1), en su estudio para evaluar el hierro nanocerovalente (nZVI) sintetizado biológicamente como activador de la oxidación de persulfato de hidrocarburos de petróleo en suelos contaminados con lodos de

petróleo , se realizó una serie de experimentos por lotes. Nanopartículas de hierro de valencia cero fueron sintetizadas utilizando extractos de cáscara de mango verde. El sistema activado con cáscara de mango verde y hierro nanocerovalente (GMP-nZVI) mostró un aumento gradual en la concentración de hierro durante los tres días de tratamiento. Se observó un efecto más o menos similar para los tratamientos activados con C-nZVI y GMP-nZVI después del tratamiento del día 21. La eliminación de TPH del suelo contaminado con lodos de aceite utilizando GMP-nZVI demostró una degradación >90 % durante una semana de tratamiento. El recubrimiento de la superficie del material sintetizado (GMP-nZVI) podría mejorar la activación.

El Sheshtawy H. et al., (2022, p.1), en su trabajo de investigación trata de los problemas ambientales relevantes relacionados con la contaminación por petróleo de la industria del petróleo. Para lo cual, aislaron 19 bacterias que degradan el petróleo de un suelo contaminado por petróleo en la empresa procesadora de petróleo de Suez en Egipto. Sin embargo, dos especies bacterianas mostraron la mayor tasa de crecimiento de los hidrocarburos del petróleo. Estos aislamientos se identificaron mediante el análisis de la secuencia del gen 16S rDNA en *Flavobacterium johnsoniae* BS1 (NCBI Gene Bank Accession no. MT740243) y *Shewanella baltica* BS2 (número de acceso al banco de genes del NCBI MT740157). Los líquidos iónicos prepararon el método hidrotermal sintético asistido por nanocompuestos de goethita-quitosano. Las dos cepas bacterianas que degradan el aceite se inmovilizaron sobre la superficie del nanocompuesto preparado. El consorcio puro y bacteriano estudió el proceso de biorremediación sin/con nanocompuestos. Se extrajo el petróleo restante después de la biorremediación. Los resultados del estudio demostraron que la afinidad entre la superficie de las células bacterianas y el nanocompuesto preparado se investigó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). De la prueba de actividad antibacteriana del nanocompuesto, no hay efecto tóxico sobre los dos microorganismos biodegradables. El aceite remanente después de la biodegradación mostró que el consorcio bacteriano inmovilizado logró la máxima eficiencia de degradación 93,32% después de 3 días de incubación.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de diseño de investigación

La presente investigación es cualitativa, ya que es un tipo de investigación que produce datos descriptivos u observaciones sobre las palabras o el comportamiento de los sujetos (Salgado A., 2007, p.71). debido a ello se aplica la investigación cualitativa en el presente trabajo, debido a que, se estudiarán a los trabajos realizados por investigadores para observar los comportamientos de sus estudios.

Ante ello, el tipo de investigación es aplicada, ya que, este tipo de estudio se encarga de buscar resolver un problema específico que son relevantes para la sociedad y que, por lo general, con los estudios revelan conocimientos que ayudan a resolverlos (Carter S. et al., 2019, p.2). Además, también busca brindar soluciones innovadoras a problemas que afectan a un individuo o a una sociedad (Lozada J., 2014, p.5). Siendo este tipo de investigación elegido, ya que, se busca resolver la problemática de la contaminados de PHs en suelos que afecta a muchos grupos de personas.

El diseño aplicado es sistemático; debido a que, las revisiones sistemáticas dan mayor peso a los estudios metodológicamente rigurosos y algunos investigadores incluso sugieren que las revisiones sistemáticas ocupen el primer lugar en la lista de métodos más rigurosos. Además, también sugieren que incluso puede haber un continuo de "sistematicidad" en las revisiones bibliográficas, pasando de las revisiones puramente narrativas a las revisiones sistemáticas y, finalmente, al metaanálisis en la cima (Sovacool B. et al., 2018, p.2). Ante ello, se afirma que se aplicó el diseño sistemático por los motivos mencionados así mismo, debido a que, se recogió y recopiló los datos de los estudios experimentales a estudiar.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Al ser una revisión sistemática se identificó y elaboró las categorías y sub categorías en base a los objetivos específicos; siendo tres las categorías planteadas en el anexo 1, y de cada categoría se generó sus respectivas sub categorías que permitieron profundizar en las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs, el promedio de la tasa de eliminación porcentual y el hidrocarburo de petróleo más presente.

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio viene a ser el lugar o entorno físico donde se tiene acceso para realizar el trabajo de investigación; por ende, al ser este un trabajo sistemático se consideró como escenario a los diversos laboratorios y centros universitarios donde los autores de los artículos analizados aplicaron las diversas tecnologías físicas, química y biológicas para la remediación de suelos contaminados de PHs.

3.4. Participantes

Los participantes son aquellos que forman parte del proceso y desarrollo de un estudio, y forman pieza clave de la realización del trabajo. Por lo cual, al ser una revisión el presente trabajo los participantes fueron: sciencedirect, scielo, scopus y Proquest.

Estas plataformas virtuales brindan servicios en línea que permiten un acceso a diversas bases de datos como revistas científicas, artículos científicos, citas científicas, entre otro. Además, estas bibliotecas electrónicas fueron elegidas debido a su alta calidad y que son fuentes indexadas que brindan empuje para la investigación científica.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

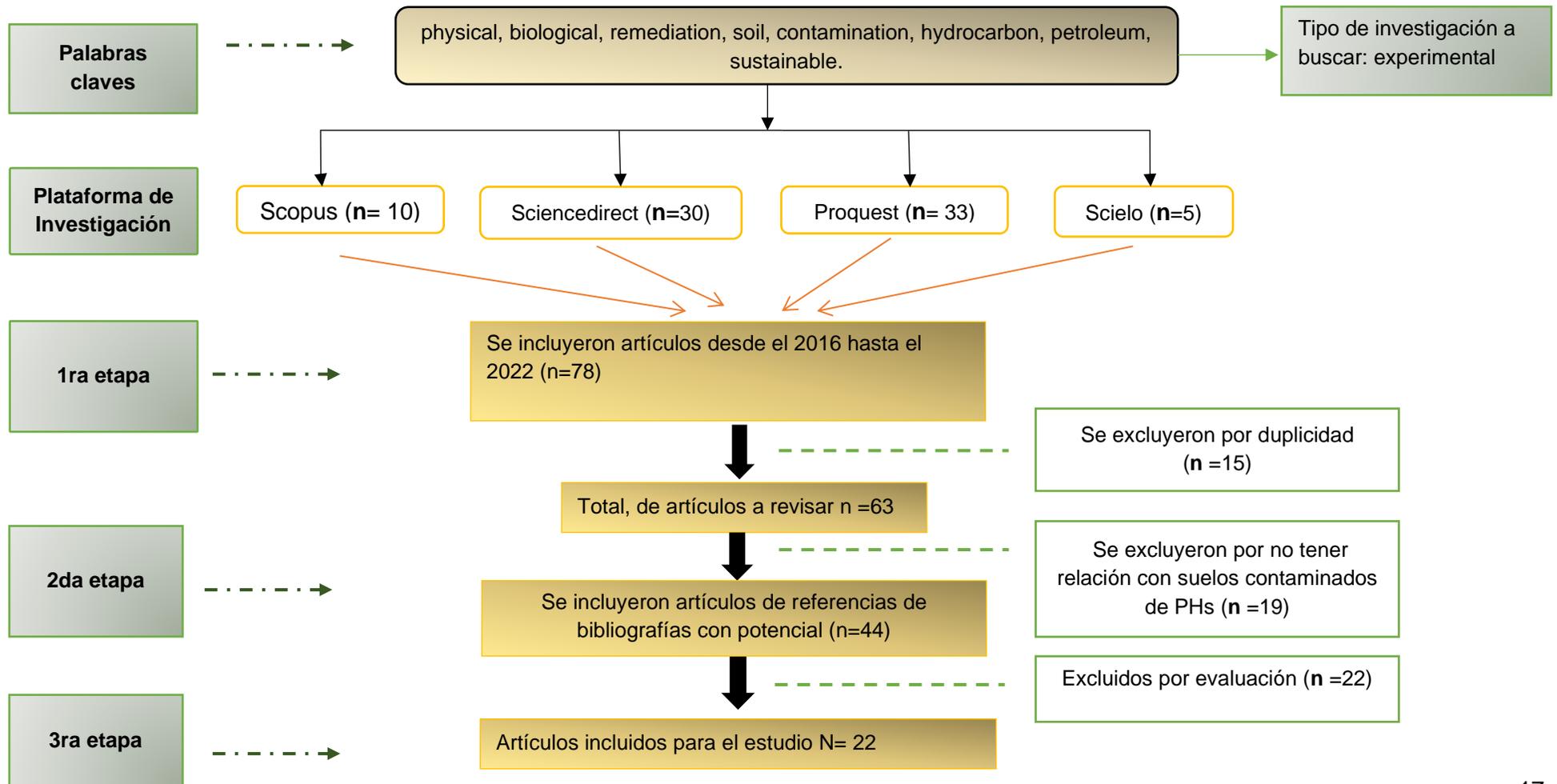
Este trabajo de investigación aplicó el análisis documental como técnica de recolección de datos, siendo este un método que permite generar un fácil acceso de documentos originales y facilitar su uso y recuperación (Ocak G. y Ocak I., 2016, p.648).

Ante la técnica usada en el estudio, fue necesario la ficha encontrada en el anexo 2, donde se elaboró la ficha de análisis de contenido, el cual fue el instrumento de recolección de datos propuesto. Así, para el uso de la ficha fue necesario primero conocer el documento a plasmar, generar resúmenes y extraer datos relevantes y que permitan sintetizar la información del documento original. Siendo los puntos establecidos en dicha ficha: datos de autor, tipo de investigación, objetivos, metodología, tipos de tecnologías, efectos de los hidrocarburos, porcentajes de eliminación, resultados y conclusiones.

3.6. Procedimiento

El procedimiento seguido en este estudio se clasificó por etapas, siendo 3 las mostradas en el gráfico 4; teniendo como criterios que se cumplieran los objetivos a desarrollar en el estudio.

Gráfico N°4. Procedimiento de estudio



3.7. Rigor científico

El rigor científico es la aplicación estricta del método científico para garantizar un diseño experimental sólido e imparciales. Ante ello, en este trabajo de investigación se cumplió con 4 criterios que permiten obtener el rigor científico del estudio; siendo estos la dependencia, confirmabilidad, transferibilidad, credibilidad; describiéndose a continuación citado por (Cornejo et.al.,2011, pág.15).

La dependencia; este criterio presenta mayor controversia entre los investigadores, debido a que se discute su estabilidad en relación a los datos presentes en los resultados y es que, señalan que es casi imposible conseguirlos si los estudios son prácticos y por ende irrepetibles; por ello no se puede tener una precisión en su totalidad. Ante ello, el presente trabajo se encargó de brindar la transcripción de los estudios sin alterar su información y sin presentar opiniones que puedan modificar algún resultado, intentado que fueran los más exactos posibles a los que indican los estudios originales.

La confirmabilidad, este criterio recae en el investigador, ya que, este debe permitir que cualquier persona pueda aplicar el mismo estudio y obtener resultados similares; lo cual se logra solo siguiendo las pistas dejadas por el autor responsable de la investigación. Es así que este criterio se cumplió dejando la mayor información de la metodología usada como las técnicas y métodos usados, para que así se pueda continuar con el estudio.

Transferibilidad, este criterio consiste en la posibilidad que los resultados que se generen en un trabajo puedan ser aplicados a otros mostrando un amplio conocimiento de los fenómenos. Y es cumplido detallando la información de la manera más objetiva posible y brindando toda la información de los autores de quienes se utilizó los datos.

Credibilidad, se enfoca en la capacidad del investigador para transmitir de manera clara los puntos de vista del autor y esto se consigue demostrando que los hallazgos obtenidos son verídicos y reales. Siendo obtenido este criterio plasmando información selectiva de los estudios que aplicaron las técnicas físicas, químicas y biológicas y brindando la mayor información posible.

3.8. Método de análisis de información

El método de la información consistió en el uso de la triangulación, debido a que, la triangulación puede adoptar varias formas, pero suele referirse al empleo de múltiples fuentes y métodos de recolección de datos (Cadena-Iñiguez, P. et al., 2017, p.7).

Ante ello, se utilizó el método de análisis documental para sintetizar información relevante de los estudios a analizar así también se empleó la matriz apriorística, el cual permitió que se detalle los tres objetivos específicos del estudio; elaborando como extensión detallada las sub categorías; detalladas a continuación:

Categorías: tecnologías más usadas, promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología, efectos de los hidrocarburos.

Subcategorías: Físicas y Biológicas / Eficiencia de eliminación alta, Eficiencia de eliminación baja, Eficiencia de eliminación media / suelo agrícola, platas y/o vegetación y salud humana.

3.9. Aspectos éticos

Se cumplió con el respeto a la autoría, citando a cada investigador mediante la norma ISO 690-2, así también, se cumplió con los lineamientos establecidos por la resolución N° 0103-2018 y la guía de productos observables de la UCV, por último, se cumplió con la autenticidad del estudio, comprobándolo mediante el programa anti plagio por el cual pasó el presente documento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tecnologías de remediación de suelos contaminados de PHs con un enfoque ecológico y sostenible se encuentran clasificados dentro de los tratamientos físicos, y biológicos; por lo cual se buscaron de buscaron desarrollar los tres problemas específicos del estudio en las tablas 1, 2 y 3.

Las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs se detallan en la tabla 1 y 2, mediante la comparación de la cantidad de estudios aplicados, donde se tuvo como criterio el tipo de método de remediación usado, siendo el tratamiento biológico mediante los métodos de biorremediación y fitorremediación.

Tabla N°1. Tecnología más usada en el tratamiento biológico

Tratamiento biológico / Método de fitorremediación		
Especies de plantas	Contaminante del suelo	Referencias
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>), maíz (<i>Zea mays</i>), trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>), alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) y ballica (<i>Lolium multiflorum</i>)	Hidrocarburos de petróleo en suelos contaminados con petróleo crudo	Yousaf U. et al. (2022, p.1)
<i>Imperata cylindrica</i> ; <i>mucuna bracteata</i> ; <i>Pteris vittata</i> ; y <i>Epipremnum aureum</i> ;	Petróleo crudo	Tang K. y Ángela J. (2019, p.2)
<i>Medicago sativa</i> L	Hidrocarburos de petróleo	Miguel et al. (2022, p.1)
Tratamiento biológico / Método de biorremediación		
microorganismos	Contaminante del suelo	Referencias
<i>Aspergillus</i> spp.	Petróleo crudo	Zhang jun Hui et al. (2016, p.1)
<i>Penicillium</i> sp. RMA1 y RMA2	Petróleo crudo	Al-Hawash A. et al. (2018, p.1)
<i>Aspergillus</i> sp. RFC-1	Diferentes PH	Al-Hawash A. et al. (2019, p.1)
<i>Ochrobactrum</i> sp.	petróleo crudo	Varjani S. et al. (2016, p.1)
<i>candida tropicalis</i>	Diesel	Adams G. et al. (2016, p.1)

<i>Pseudomonas</i> sp.	Gasolina, diésel y aceite de motor de desecho	Ruley Jane A. et al., (2020, p.1)
<i>Dolor por Bacillus</i> D11, <i>Pseudomonas stutzeri</i> D13 y <i>Bacillus cereus</i> D12,	Petróleo-diésel TPH-DRO.	Alsayegh S. et al., (2021, p.2)

De acuerdo con la tabla 1 se tiene que 3 de los 10 estudios que aplicaron tratamiento biológico usaron el método de fitorremediación, mientras que 7 aplicaron el método de biorremediación usando hongos y bacterias como microorganismos.

Ello debido a que los estudios convencionales de fitorremediación se han asociado con la bioestimulación mediante la adición de fertilizantes, pero últimamente se han relacionado con la bioaumentación con bacterias u hongos (Tang Kuok et al., 2019, p.4).

Por otro lado, en la tabla 2, se clasificaron los tratamientos físicos aplicados a los tratamientos de los hidrocarburos de petróleo.

Tabla N°2. Tecnología más usada en el tratamiento físico

Tratamientos físicos / in situ			
Tipo de PH	nanomateriales	Condiciones	Referencias
PH totales	Óxido de hierro biogénico	Los PH totales se degradan en 14 h y 5 d a pH 6,0 y 0,74 M de oxidante.	Bolade P. et al. (2020, p.1)
PH totales	Óxido de hierro biogénico	Los PH totales se degradan en 14 h y 5 d a pH 6,0 y 0,74 M de oxidante.	Bolade Oladotun P. et al., (2021, p.1)
PHs y PAHs totales n-alcanos	Sulfato ferroso enriquecido con biocarbón y persulfato activado	Elimina la diferencia a pH 7 con incubadora con agitación a 25 °C en 7 d	Xia Chunqing et al., (2022, p.1)
PH totales	Nanopartículas de hierro recubiertas de mortíño (<i>Vaccinium floribundum</i>)	Elimina los PH totales en 32 h a pH entre 9 y 109 con concertación inicial de 94,20 mg L ⁻¹	Murgueitio E. et al., (2018, p.1)
PH totales	Cáscara de mango verde-hierro valente nanozero	Eliminación total de PHs durante un tratamiento de una semana a la temperatura de 20 °C	Desalegn Biruck et al., (2018, p.1)

		en un agitador rotatorio (200 rpm)	
Gasóleo	Hierro cerivalente a nanoescala activado con peroximonosulfato	Elimina el hidrocarburo de petróleo envejecido en 2 h	Bajagain R. y Jeong S., (2021, p.1)
Hidrocarburos de Petróleo	Nanocompuesto de goethita-quitosano	El nanocompuesto aumenta el proceso de biodegradación en 3 d de incubación	El Sheshtawy H. et al., (2022, p.1)
Tratamientos físicos / ex situ			
Tipo de contaminante	Configuración de los bioelectroquímicos (BES) y condición de operación del reactor	microorganismos	Referencia
Petróleo hidrocarburos	Los hidrocarburos de petróleo actúan como donadores de electrones y glucosa, con Tween 80 en celdas de combustible microbianas de una sola cámara	Activado Lodo	Zhao Lin et al. (2019, p.1)
Petróleo hidrocarburos	Los hidrocarburos de petróleo actúan como donadores de electrones y el agua óxica como aceptor de electrones en reactores de doble cámara tipo botella de celdas de combustible microbianas.	No indica	Wang Huan et al. (2020, p.1)
Gasóleo	El diesel actúa como donante de electrones y el oxígeno como aceptor en celdas de combustible microbianas tubulares con cátodo de aire	Microbiano anaeróbico Consorcio	Wang Huan et al. (2019, p.1)
Gasóleo	El diésel actúa como donante de electrones y el oxígeno como aceptor de electrones en pilas de combustible microbianas de doble cámara por lotes	Culturas mixtas	Chen Ying et al., (2017, p.1)
hidrocarburo de petróleo	Los hidrocarburos de petróleo actúan como donadores de electrones y el oxígeno actúa como aceptor en celdas de combustible microbianas	No indica	Li Xiaojing et al., (2019, p.1)

	continuas de doble cámara.		
--	----------------------------	--	--

Mediante la tabla 2 se tiene que 7 de los 12 estudios que aplicaron el tratamiento físico emplearon un método *in situ* mientras que 5 realizaron la eliminación de los PHs mediante métodos *ex situ*.

Teniendo que, mediante la comparación de la tabla 1 y 2, los tratamientos físicos son aplicados en un 55% de estudios siendo 12 de 22 investigadores quienes lo aplican mientras que un 45% aplica métodos biológicos.

Ello debido a que este tratamiento incluye métodos de separación y reciclaje, es decir, lavado de suelo, solidificación, vitrificación, estabilización, desorción térmica, incineración y extracción de vapor y estos métodos, aunque pueden generar problemas durante la excavación debido a los riesgos de contaminación del suelo a través de la manipulación y el transporte, se puede evitar delineando adecuadamente el sitio antes de la excavación (Wang Haonan et al., 2022, p.3).

Presentando respaldo a lo mencionado se encuentra el estudio de Yousaf et al. (2022, p.5), quien manifiesta que la fitorremediación es la estrategia de remediación más exitosa para reducir los compuestos orgánicos persistentes, y recientemente ha atraído mucho interés debido a su capacidad para degradar contaminantes en un área grande, su amplia aplicabilidad, su respeto por el medio ambiente y su rentabilidad. Pero Al-Hawash et al. (2019, p.4), refuta lo mencionado, señalando que, sin embargo, solo unas pocas plantas pueden absorber estos químicos orgánicos del suelo y las plantas no pueden descomponer o desintoxicar los compuestos orgánicos persistentes debido a la falta de enzimas fijas.

Así también lo corrobora Sohoo I. et al., (2020, p.2), quien señala que estos métodos se consideran una solución provisional para descontaminar áreas contaminadas porque monitorea constantemente el riesgo potencial, los costos y otras responsabilidades relacionadas. Pero ello, es rechazado por lo expuesto por Wang Z. et al., (2022, p.1), quien una serie de estudios han llevado a cabo experimentos científicos que han demostrado que la adopción de la fitorremediación es una forma sostenible, ecológica y rentable de eco-restauración de suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo (TPH).

Pero Ruley Jane A. et al., (2022, p.1), contrarresta lo expuesto sobre la técnica biológica de fitorremediación, afirmando que a pesar de las diversas ventajas que pueda presentar la fitorremediación por sí sola no es una técnica efectiva y eficiente para implementar, especialmente en grandes extensiones de suelos contaminados con altos niveles de concentración de TPH.

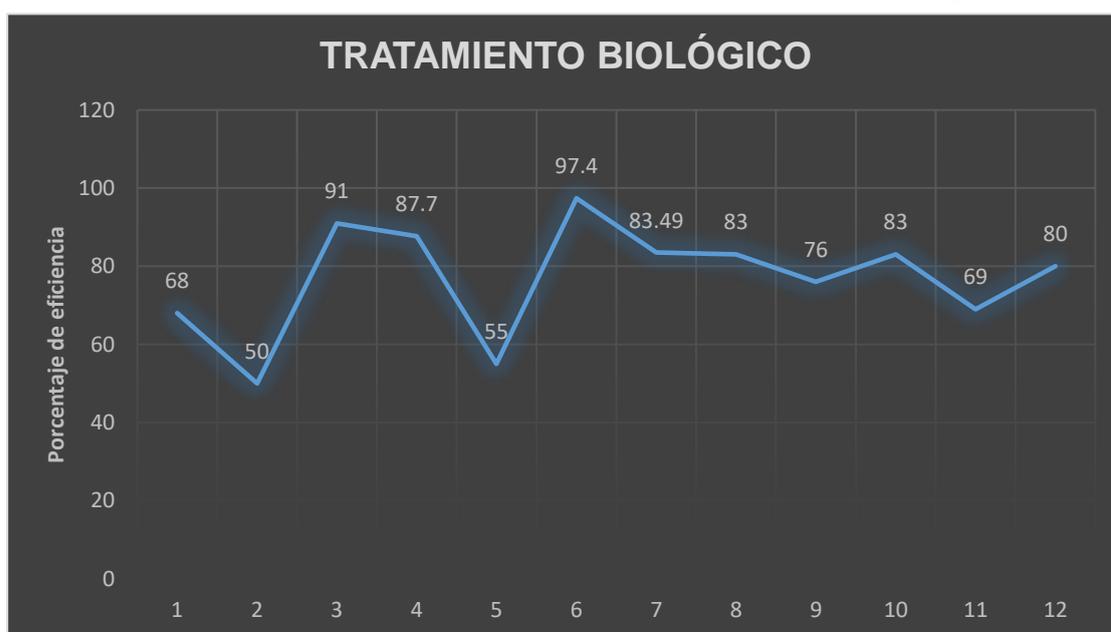
Por otro lado, se buscó definir el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs teniendo como criterios la eficiencia de eliminación, mostrándose los resultados de la comparación en la tabla 3 y 4.

Tabla N° 3. Tasa de eliminación porcentual de los tratamientos biológicos

Tratamiento biológico / Método de fitorremediación		
Contaminante del suelo	Eficiencia de eliminación	Referencias
Hidrocarburos de petróleo en suelos contaminados con petróleo crudo	La mayor eliminación de TPH (68,5 %) la obtuvo el ryegrass con compost, el trébol blanco con biocarbón (68 %). Sin ninguna enmienda del suelo, el raigrás y la alfalfa mostraron 59,55 y 35,21% de degradación de TPH, respectivamente. Solo biocarbón y compost eliminaron 27,24 % y 6,01 % de TPH, respectivamente, en 62 días	Yousaf U. et al. (2022, p.1)
Petróleo crudo	<i>Mucuna bracteata</i> (31%), <i>Pteris vittata</i> (36%); <i>Imperata cylindrica</i> (40%); <i>Epipremnum aureum</i> (50%); para eliminar el total de PH dentro de los 42 días	Tang K. y Ángela J. (2019, p.2)
hidrocarburos de petróleo	<i>M. sativa</i> + Consorcio dio como resultado una eliminación del 91 % de los hidrocarburos del diésel en solo 60 días	Miguel et al. (2022, p.1)
Tratamiento biológico / Método de biorremediación		
Contaminante del suelo	Tasa de eliminación	Referencias
Petróleo crudo	59–87,7% de la recuperación de petróleo crudo	Zhang Jun Hui et al. (2016, p.1)
Petróleo crudo	Degradación lograda por RMA1-57% y RMA2 55%	Al-Hawash A. et al. (2018, p.1)
Diferentes PH	60,3–97,4 % de eliminación de PH de ambientes acuosos	Al-Hawash A. et

		al. (2019, p.1)
petróleo crudo	83,49 % de degradación del crudo equivalente al 3 % v/v	Varjani S. et al. (2016, p.1)
Diesel	Degradación del 83% del diesel	Adams G. et al. (2016, p.1)
Gasolina, diésel y aceite de motor de desecho	Degradación lograda gasolina-76%, diésel-83% y aceite de motor usado -69%	Ruley Jane A. et al., (2020, p.1)
Petróleo-diésel TPH-DRO.	El consorcio de cepas eliminó hasta un 80 % de petróleo-diésel, extracto a 31,1 mg g ⁻¹ TPH-DRO.	Alsayegh S. et al., (2021, p.2)

Gráfico N° 5. Promedio porcentual de los tratamientos biológicos



Elaboración propia

De acuerdo con el gráfico 5 respecto a la tabla 3, se tiene que los tratamientos biológicos presentan un promedio de eficiencia de eliminación alta, encontrándose entre un 80 y 90%. Ello debido a que las comunidades microbianas muestran un alta de degradación de PHs en el suelo.

Siendo así corroborado por: Yousaf U. et al. (2022, p.1), Tang K. y Ángela J. (2019, p.2), Miguel et al. (2022, p.1). Así también, los autores como: Zhang jun Hui et al. (2016, p.1), Al-Hawash A. et al. (2019, p.1), Varjani S. et al. (2016, p.1), Adams G. et

al. (2016, p.1) y Alsayegh S. et al., (2021, p.2); presentaron porcentajes de eliminación del 87,7%, 97,4 %, 83,49 % y 93%.

Así mismo lo corrobora Ruley Jane A. et al., (2020, p.1), quien presentó una degradación de la gasolina en un 76%, del diésel en un 83% y aceite de motor usado en un 69%.

Mientras que la tasa de eliminación de los tratamientos físicos se detalla en el gráfico 6 respecto a la tabla 4.

Tabla N° 4. Tasa de eliminación porcentual de los tratamientos físicos

Tratamientos físicos / in situ		
Tipo de PH	Eficiencia de remediación	Referencias
PH totales	95 %	Bolade P. et al. (2020, p.1)
PH totales	95 %	Bolade Oladotun P. et al., (2021, p.1)
PHs y PAHs totales n-alcanos	62 %	Xia Chunqing et al., (2022, p.1)
	78 %	
	92 %	
PH totales	88 %	Murgueitio E. et al., (2018, p.1)
PH totales	90 %	Desalegn Biruck et al., (2018, p.1)
Gasóleo	61 %	Bajagain R. y Jeong S., (2021, p.1)
Hidrocarburos de Petróleo	93 %	El Sheshtawy H. et al., (2022, p.1)
Tratamientos físicos / ex situ		
Tipo de contaminante	Tasa de eficiencia de remediación	Referencia
Petróleo	45 %	Zhao Lin et al. (2019, p.1)
hidrocarburos		
Petróleo	29 %	Wang Huan et al. (2020, p.1)
hidrocarburos		
Gasóleo	59 %	Wang Huan et al. (2019, p.1)
Gasóleo	83 %	Chen Ying et al., (2017, p.1)
hidrocarburo de petróleo	17 %	Li Xiaojing et al., (2019, p.1)

Gráfico N° 6. Promedio porcentual de los tratamientos físicos



Elaboración propia

De acuerdo con el gráfico 6 respecto a la tabla 4, se tiene que el promedio de eficiencia de remoción de los tratamientos físicos es intermedio, encontrándose un promedio de eliminación del 40 al 80%.

Siendo así mediante la comparación del gráfico 5 y 6, que el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs se encuentra en un promedio alto para los tratamientos biológicos con un 80 a 90% y una tasa de eliminación media para los tratamientos físicos, presentando un porcentaje del 40 al 80%.

Siendo así corroborado por los estudios de: Zhao Lin et al. (2019, p.1), Wang Huan et al. (2020, p.1), Wang Huan et al. (2019, p.1) y Li Xiaojing et al., (2019, p.1), empleando el tratamiento físico ex situ, para eliminar los contaminantes Petróleo, hidrocarburos, Petróleo, hidrocarburos, Gasóleo e hidrocarburo de petróleo presentaron una tasa de eficiencia de remediación del 45 %, 29 %, 59 % y 17%.

Pero, además de los estudios anteriores sobre la remediación de PH de suelos contaminados, por ejemplo, Yu et al. (2021, p.4) investigaron la degradación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo como sustratos utilizando celdas de combustible microbianas dobles y demostraron que la degradación de

contaminantes aumentó en aproximadamente un 59 % en comparación con el control de circuito abierto en 115 días.

Finalmente, algunos informes mostraron que el uso de celdas de combustible microbianas y BES podría mejorar la degradación de los hidrocarburos de petróleo, particularmente las fracciones de asfaltenos, compuestos alifáticos y aromáticos (Jin S. y Fallgren P., 2022, p.2).

Por último, se analizó los efectos de los hidrocarburos de petróleo en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminados; mediante la tabla 5.

Tabla N° 5. Efectos de hidrocarburos de petróleo en el medio ambiente y salud humana

Efecto de los hidrocarburos de petróleo (PHs)	Referencias
EN SUELOS AGRÍCOLAS	
Afecta principalmente las propiedades del suelo a través de la adsorción, la biodegradación y la lixiviación	Logeshwaran P. et al., (2018, p.2), Hou Jinyu et al., (2021, p.2).
Afecta negativamente la fertilidad del suelo y las propiedades físicas y químicas	Ruley Jane A. et al., (2020, p.1), Alsayegh S. et al., (2021, p.2),
Destruye la textura y la estructura y reduce los espacios porosos y satura la conductividad hidráulica	Hou Jinyu et al., (2021, p.2). Steliga T. y Kluk D., (2020, p.3).
PLANTAS/VEGETACIÓN	
La infiltración de agua obstruida por el aceite puede afectar gravemente el crecimiento de las planta	Bolade P. et al. (2020, p.1), Bajagain R. y Jeong S., (2021, p.1), El Sheshtawy H. et al., (2022, p.1)
Se reduce principalmente la longitud de la raíz y el área foliar de los cultivos de girasol	Yousaf U. et al. (2022, p.1), Tang K. y Ángela J. (2019, p.2), Miguel et al. (2022, p.1), Li Xiaojing et al., (2019, p.1)
Afecta el crecimiento de las plantas debido a la inhibición de la absorción de sales minerales y agua, lo que provoca la detención de los procesos metabólicos de las plantas, lo que aumenta aún más la escasez de nutrientes y clorofila, lo que lleva a una disminución de la resistencia a las plagas de enfermedades.	Bolade Oladotun P. et al., (2021, p.1), Xia Chunqing et al., (2022, p.1), Murgueitio E. et al., (2018, p.1), Desalegn Biruck et al., (2018, p.1)
SALUD HUMANA	
Efectos toxicológicos para la salud humana y animal, como mutagenicidad, hemotoxicidad, genotoxicidad, carcinogenicidad, toxicidad ocular,	Varjani S. et al. (2016, p.1), Adams G. et al. (2016, p.1), Zhao Lin et al. (2019, p.1), Wang Huan et al. (2020,

cardiotoxicidad, nefrotoxicidad, neurotoxicidad, teratogenicidad,	hepatotoxicidad, inmunotoxicidad, citotoxicidad y	p.1), Wang Huan et al. (2019, p.1), Chen Ying et al., (2017, p.1).
Problemas respiratorios como gripe, inflamatorios a corto plazo y a largo plazo melanomas, genototoxicidad y mutagénicos.		Zhang jun Hui et al. (2016, p.1), Al- Hawash A. et al. (2018, p.1), Al- Hawash A. et al. (2019, p.1)

De acuerdo a la comparación de los estudios en la tabla 5, se tiene que los efectos que más se presentan por la contaminación de los PHs en el medio ambiente son en suelos agrícolas y en la vegetación.

Yousaf U. et al. (2022, p.1), Tang K. y Ángela J. (2019, p.2), Steliga T. y Kluk D., (2020, p.3), Logeshwaran P. et al., (2018, p.2), Xia Chunqing et al., (2022, p.1) y Murgueitio E. et al., (2018, p.1), son uno de los cuantos investigadores que lo confirman, apoyando los efectos en los suelos agrícolas donde se resaltan los problemas de fertilidad del suelo, y las alteraciones en las propiedades físicas y químicas. Así como la germinación de las plantas de cultivos.

Así mismo, lo confirma Steliga T. y Kluk D., (2020, p.3); quien señala que emergieran semillas de cebada después de 14 días de exposición en el suelo contaminado, incluso después de la lixiviación y el alivio de las sales del suelo contaminado. Así mismo, la contaminación por petróleo causa deformaciones de los pigmentos de las hojas, acumulación de H_2O_2 , estrés oxidativo, incluso muerte de células vegetales (Hou Jinyu et al., 2021, p.2).

Además, El Sheshtawy H. et al., (2022, p.1), informó sobre la inhibición del crecimiento de los brotes de raíces, la longitud de las hojas y el retraso en la expansión celular del maíz. Sin embargo, la fitotoxicidad de los hidrocarburos de petróleo difiere entre varias especies de plantas.

Pero, de acuerdo con Xia Chunqing et al., (2022, p.1); algunas especies de cultivos como el trigo, el centeno y la avena podrían tolerar y acumular considerablemente estos contaminantes y se utilizan para la fitorremediación, que se analizan por separado en otro lugar. Mientras que Li fengmei et al., (2020, p.3), en su trabajo estudió los ecotoxicológicos del suelo contaminado con petróleo en la lombriz de tierra; informando que las altas concentraciones de petróleo en el suelo contaminado podrían dañar significativamente el capullo y afectar negativamente el ADN en las vesículas seminales de la lombriz de tierra y reducir su peso corporal.

V. CONCLUSIONES

Esta revisión demostró que la biorremediación es un proceso productivo y atractivo que utiliza la actividad microbiana para remediar, limpiar, gestionar y rehabilitar el medio ambiente contaminado. Los procesos de biodegradación natural se han mejorado con la biorremediación, que se considera una técnica para limpiar la contaminación. En comparación con los métodos fisicoquímicos, la biorremediación es un método muy activo sin alterar los entornos contaminados.

Mediante el primer objetivo de estudio se concluye que la técnica física es más usada, y aunque la técnica biológica fue por poco menos aplicada presenta un enfoque ecológico y sostenible. Así mismo, entre la técnica biológica el tratamiento de biorremediación empleando bacterias y hongos fue la más usada. Mientras que con la técnica física el método in situ fue la más usada.

Mediante el segundo objetivo, se define que el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs se encuentra en un promedio alto para los tratamientos biológicos con un 80 a 90% y una tasa de eliminación media para los tratamientos físicos, presentando un porcentaje del 40 al 80%.

Por último, al analizar los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminado, se tiene que los efectos que más se presentan por la contaminación de los PHs en el medio ambiente son en suelos agrícolas y en la vegetación. Donde, los efectos en los suelos agrícolas resaltan los problemas de fertilidad del suelo, y las alteraciones en las propiedades físicas y químicas, así como la germinación de las plantas de cultivos.

VI. RECOMENDACIONES

Mediante los estudios analizados se pudo observar que los estudios más aplicados no necesariamente se realizan con un enfoque ecológico y sostenible, por lo cual se recomienda ampliar los enfoques ecológicos y la invención de nuevos mecanismos de degradación de PH para restaurar suelos contaminados con rentabilidad.

Así mismo, se recomienda, aborda en tecnologías de remediación de suelos disponibles para restaurar el suelo utilizado a escala de campo, ya que, mediante los estudios analizados se pudo comprobar que la mayor cantidad de investigaciones aplican sus trabajos a escala de laboratorio, y estos no siempre pueden brindar los resultados confiables, ya que, las condiciones ambientales, como la temperatura y la lluvia pueden influir dependiendo el tipo de método que se utilice.

Además, para permitir la implementación adecuada de los métodos se deben crear técnicas eficientes y precisas para monitorear la limpieza ambiental; por lo que se sugiere a los futuros investigadores interesados en implementar enfoques ecológico y sostenible centrarse en técnicas eficientes, pero sin perder la sostenibilidad con el ambiente.

Por último, se ha notado la necesidad de realizar más investigación en biología sintética e ingeniería genética para facilitar el diseño y desarrollo de biosensores microbianos para un monitoreo y evaluación eficientes y precisos de la biorremediación, así como para emplear una herramienta sostenible para la rehabilitación de tecnologías de remediación ambiental; ya que, los estudios que se han encontrado aplican las técnicas comunes y no presentan una innovación.

REFERENCIAS

1. ABBASIAN, Firouz, et al. A comprehensive review of aliphatic hydrocarbon biodegradation by bacteria. Applied biochemistry and biotechnology, 2015, vol. 176, no 3, p. 670-699. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1603-5>
2. ABDELHAFEEZ, I., et al. A review on green remediation techniques for hydrocarbons and heavy metals contaminated soil. Current Chemistry Letters, 2022, vol. 11, no 1, p. 43-62. Disponible en: <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2021.9.006>
3. ACHARYA, Prasannajit, et al. Assessment of Total Petroleum Hydrocarbon Accumulation in Crabs of Chilika Lagoon, India. En Coastal Ecosystems. Springer, Cham, 2022. p. 285-303. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-84255-0_12
4. ADAMS, Godleads Omokhagbor, et al. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 2016, vol. 3, no 1, p. 28-39. Disponible en: <https://doi.org/10.12691/ijebb-3-1-5>
5. AL-HAWASH, Adnan B., et al. Principles of microbial degradation of petroleum hydrocarbons in the environment. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2018, vol. 44, no 2, p. 71-76. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2018.06.001>
6. AL-HAWASH, Adnan B., et al. Isolation and characterization of two crude oil-degrading fungi strains from Rumaila oil field, Iraq. Biotechnology reports, 2018, vol. 17, p. 104-109. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.12.006>
7. ALSAYEGH, Shaikha Y.; AL-GHOUTI, Mohammad A.; ZOUARI, Nabil. Study of bacterial interactions in reconstituted hydrocarbon-degrading bacterial consortia from a local collection, for the bioremediation of weathered oily-soils. Biotechnology Reports, 2021, vol. 29, p. e00598. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00598>

8. AMBAYE, Teklit Gebregiorgis, et al. Preparation, characterization and application of biosurfactant in various industries: A critical review on progress, challenges and perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 24, p. 102090. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102090>
9. ARROYO, S., et al. Reduction of hydrocarbons in contaminated soil through paired sorption and advanced oxidation processes. *Soil Security*, 2021, vol. 4, p. 100013. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100013>
10. ASEJEJE, Gbolahan Iyiola; IPEAIYEDA, Ayodele Rotimi; ONIANWA, Percy Chuks. Occurrence of BTEX from petroleum hydrocarbons in surface water, sediment, and biota from Ubeji Creek of Delta State, Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no 12, p. 15361-15379. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11196-y>
11. BAJAGAIN, Rishikesh; JEONG, Seung-Woo. Degradation of petroleum hydrocarbons in soil via advanced oxidation process using peroxymonosulfate activated by nanoscale zero-valent iron. *Chemosphere*, 2021, vol. 270, p. 128627. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128627>
12. BALINT, Alexandru. Physical, chemical and toxicological properties of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in human exposure assessments to contaminated soil and groundwater. En *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134203016>
13. BEZERRA, Káren Gercyane O., et al. Saponins and microbial biosurfactants: potential raw materials for the formulation of cosmetics. *Biotechnology progress*, 2018, vol. 34, no 6, p. 1482-1493. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/btpr.2682>
14. BISHT, Sandeep, et al. Bioremediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2015, vol. 46, p. 7-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1517-838246120131354>
15. BOJAN, Olivia K., et al. Discovery of oxygenated hydrocarbon biodegradation products at a late-stage petroleum release site. *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35,

no 20, p. 16713-16723. Disponible en:
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02642>

16. BOLADE, Oladotun P., et al. Biogenic iron oxide nanoparticles and activated sodium persulphate for hydrocarbon remediation in contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 23, p. 101719. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101719>
17. CHENG, Ying, et al. Integrated electrochemical treatment systems for facilitating the bioremediation of oil spill contaminated soil. *Chemosphere*, 2017, vol. 175, p. 294-299. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.079>
18. CHEN, Yun-An, et al. Effect of soil organic matter on petroleum hydrocarbon degradation in diesel/fuel oil-contaminated soil. *Journal of bioscience and bioengineering*, 2020, vol. 129, no 5, p. 603-612. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.12.001>
19. CHEN, Zhong, et al. Continuous supercritical water oxidation treatment of oil-based drill cuttings using municipal sewage sludge as diluent. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 384, p. 121225. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121225>
20. CHOKOR, Augustine. Total petroleum and aliphatic hydrocarbons profile of the River Niger surface water at Okpu and Iyiowa-Odekpe regions in South-Eastern, Nigeria. AA Chokor. Total Petroleum and Aliphatic Hydrocarbons Profile of the River Niger Surface Water at Okpu and Iyiowa-Odekpe Regions in South-Eastern, Nigeria. *Chemistry International*, 2021, vol. 7, no 3, p. 188-196. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4899763>
21. DESALEGN, Biruck, et al. Green mango peel-nanozerovalent iron activated persulfate oxidation of petroleum hydrocarbons in oil sludge contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, vol. 11, p. 142-152. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.05.007>
22. EBADI, Ali, et al. Effective bioremediation of a petroleum-polluted saline soil by a surfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* consortium. *Journal of*

- advanced research, 2017, vol. 8, no 6, p. 627-633. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.06.008>
23. EL-SHESHTAWY, H. S.; AMAN, D.; NASSAR, H. N. A Novel Bioremediation Technique for Petroleum Hydrocarbons by Bacterial Consortium Immobilized on Goethite-chitosan Nanocomposite. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2022, vol. 31, no 2, p. 176-199. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1916737>
24. GAO, Huan, et al. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 293, p. 118511. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511>
25. GREEN, Dannielle Senga, et al. Microplastics affect the ecological functioning of an important biogenic habitat. *Environmental science & technology*, 2017, vol. 51, no 1, p. 68-77. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04496>
26. HAQUE, Shafiul, et al. Functional microbiome strategies for the bioremediation of petroleum-hydrocarbon and heavy metal contaminated soils: A review. *Science of The Total Environment*, 2022, p. 155222. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155222>
27. HARWOOD, Amanda D.; NUTILE, Samuel A.; SIMPSON, Adam M. A comparison of activated carbon remediation success in floodplain soils contaminated with DDT and its metabolites using ex situ and in situ experimentation. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 295, p. 118687. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118687>
28. HOU, Jinyu, et al. Soil microbial community and association network shift induced by several tall fescue cultivars during the phytoremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 792, p. 148411. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148411>
29. JABBAR, Noor M., et al. Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils: A review. *Environmental*

Nanotechnology, Monitoring & Management, 2022, vol. 18, p. 100694.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100694>

30. JIN, Song; FALLGREN, Paul H. Feasibility of using bioelectrochemical systems for bioremediation. En Microbial Biodegradation and Bioremediation. Elsevier, 2022. p. 493-507. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85455-9.00026-6>
31. KUPPUSAMY, Saranya, et al. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. Chemosphere, 2017, vol. 168, p. 944-968. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>
32. LEE, Hwanhwi, et al. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote-contaminated soil by *Peniophora incarnata* KUC8836. Bioremediation Journal, 2015, vol. 19, no 1, p. 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10889868.2014.939136>
33. LI, Xiaojing, et al. Long-term effect of biochar amendment on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil microbial fuel cells. Science of the Total Environment, 2019, vol. 651, p. 796-806. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.098>
34. LIU, Yuqin, et al. Systematic study on dynamic pyrolysis behaviors, products, and mechanisms of weathered petroleum-contaminated soil with Fe₂O₃. Science of The Total Environment, 2022, p. 155197. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155197>
35. LOGESHWARAN, Panneerselvan, et al. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. Environmental technology & innovation, 2018, vol. 10, p. 175-193. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.001>
36. MENG, Long, et al. Metabolic pathway for a new strain *Pseudomonas synxantha* LSH-7': from chemotaxis to uptake of n-hexadecane. Scientific

- reports, 2017, vol. 7, no 1, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep39068>
37. MURGUEITIO, Erika, et al. Green synthesis of iron nanoparticles: application on the removal of petroleum oil from contaminated water and soils. *Journal of Nanotechnology*, 2018, vol. 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2018/4184769>
38. OSSAI, Innocent Chukwunonso, et al. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, vol. 17, p. 100526. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
39. RAJA, Pitchaikkaran, et al. Spatial distribution of total petroleum hydrocarbons in surface sediments of Palk Bay, Tamil Nadu, India. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2022, vol. 4, p. 20-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.10.002>
40. RAMADASS, Kavitha, et al. Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oil-contaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by *Pseudomonas* spp. on bioremediation. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 636, p. 968-974. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.379>
41. RULEY, Jane Alexander, et al. Rhizobacteria communities of phytoremediation plant species in petroleum hydrocarbon contaminated soil of the Sudd ecosystem, South Sudan. *International Journal of Microbiology*, 2020, vol. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2020/6639118>
42. RULEY, Jane Alexander, et al. Rizorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo: una revisión sistemática del mutualismo entre las especies de fitorremediación y los microorganismos que viven en el suelo. *Fitorremediación*, 2022, p. 263-296. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89874-4.00008-X>
43. SAKSHI; SINGH, S. K.; HARITASH, A. K. Evolutionary relationship of polycyclic aromatic hydrocarbons degrading bacteria with strains isolated from

- petroleum contaminated soil based on 16S rRNA diversity. Polycyclic Aromatic Compounds, 2020, p. 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1825003>
44. SOHOO, Ihsanullah, et al. Environmental sustainability enhancement of waste disposal sites in developing countries through controlling greenhouse gas emissions. Sustainability, 2020, vol. 13, no 1, p. 151. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13010151>
45. SOARES, Angelo Araujo, et al. Cement slurry contamination with oil-based drilling fluids. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, vol. 158, p. 433-440. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.064>
46. SONG, Xiaowei, et al. Sorption and desorption of petroleum hydrocarbons on biodegradable and nondegradable microplastics. Chemosphere, 2021, vol. 273, p. 128553. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128553>
47. STELIGA, Teresa; KLUK, Dorota. Application of Festuca arundinacea in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, vol. 194, p. 110409. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110409>
48. STIRLING, Graham, et al. Soil health, soil biology, soilborne diseases and sustainable agriculture: A guide. Csiro Publishing, 2016. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=c7upCwAAQBAJ&lpg=PP1&ots=Kp42a3qMLe&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
49. SUN, Shengli, et al. A biosurfactant-producing Pseudomonas aeruginosa S5 isolated from coking wastewater and its application for bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons. Bioresource technology, 2019, vol. 281, p. 421-428. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.087>
50. TANG, K. H. D.; ANGELA, J. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil with local plant species. En IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. p. 012054. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012054>

51. VARJANI, Sunita J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*, 2017, vol. 223, p. 277-286. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
52. WANG, Ao, et al. Synergetic effects of microbial-phytoremediation reshape microbial communities and improve degradation of petroleum contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 429, p. 128396. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128396>
53. WANG, Haonan, et al. Degradation of pyrene using single-chamber air-cathode microbial fuel cells: Electrochemical parameters and bacterial community changes. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 804, p. 150153. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150153>
54. WANG, Huan, et al. Molecular transformation of crude oil contaminated soil after bioelectrochemical degradation revealed by FT-ICR mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 2020, vol. 54, no 4, p. 2500-2509. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06164>
55. WANG, Huan, et al. Dominance of electroactive microbiomes in bioelectrochemical remediation of hydrocarbon-contaminated soils with different textures. *Chemosphere*, 2019, vol. 235, p. 776-784. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.229>
56. WANG, Yaxin, et al. Optimization of conditions for a surfactant-producing strain and application to petroleum hydrocarbon-contaminated soil bioremediation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2022, vol. 213, p. 112428. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112428>
57. WANG, Ziquan, et al. Different performance of pyrene biodegradation on metal-modified montmorillonite: Role of surface metal ions from a bioelectrochemical perspective. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 805, p. 150324. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150324>
58. WARTELL, Brian; BOUFADEL, Michel; RODRIGUEZ-FREIRE, Lucia. An effort to understand and improve the anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons: A literature review. *International Biodeterioration &*

- Biodegradation, 2021, vol. 157, p. 105156. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105156>
59. WEI, Kun-Hao, et al. Recent progress on in-situ chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, p. 128738. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128738>
60. XIA, Chunqing, et al. Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons in soil by FeS@ BC activated persulfate and its mechanism. *Separation and Purification Technology*, 2022, vol. 282, p. 120060. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120060>
61. XIONG, Deming; WANG, Chaoqiang; HUANG, Xin. Particular pollutants, physical properties, and environmental performance of porous ceramsite materials containing oil-based drilling cuttings residues. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, no 5, p. 7202-7213. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16120-6>
62. YOUSAF, Uzma, et al. Interactive effect of biochar and compost with Poaceae and Fabaceae plants on remediation of total petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil. *Chemosphere*, 2022, vol. 286, p. 131782. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131782>
63. ZHANG, Jun-Hui, et al. Degradation of crude oil by fungal enzyme preparations from *Aspergillus* spp. for potential use in enhanced oil recovery. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, vol. 91, no 4, p. 865-875. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jctb.465>
64. ZHAO, Lin, et al. Investigation of PAH and oil degradation along with electricity generation in soil using an enhanced plant-microbial fuel cell. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 221, p. 678-683. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.212>

ANEXOS:

Anexo N°1. Tabla de matriz de categorización apriorística

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CRITERIO 1
Clasificar las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs	¿Cuáles son las tecnologías más usadas para la remediación de suelos contaminados de PHs?	Tecnologías más usadas (Al Hawash A. et al., 2018, p.3).	Físicas Biológicas (Zhang Jun Hui, et al., 2016, p.2).	De acuerdo al tipo de método remediación usado
Definir el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs	¿Cuál es el promedio de la tasa de eliminación porcentual de cada tecnología generada para la remediación de suelos contaminados de PHs?	Tasa de eliminación (Chokor A., 2021, p.4).	Eficiencia de eliminación alta Eficiencia de eliminación baja Eficiencia de eliminación media (Ambaye T. et al., 2021, p.2).	De acuerdo al porcentaje de eliminación
Analizar cuáles son los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminados	¿Cuáles son los efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud humana causado por suelos contaminados?	Efectos de los PHs en el medio ambiente y la salud (Acharya P. et al., 2022, p.3).	Suelos agrícolas Plantas y/o vegetación Salud humana (Bezerra K. et al., 2018, p.2).	De acuerdo a los efectos presentados

Anexo 2. Ficha de análisis de contenido

 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS
---	--------------------------------------

TÍTULO:

PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN
TIPO DE INVESTIGACIÓN:		AUTOR (ES):
CÓDIGO		
METODOLOGÍA		
TECNOLOGÍAS MÁS USADAS		
TASA DE ELIMINACIÓN		
EFFECTOS DE LOS PHs		
RESULTADOS		
CONCLUSIONES:		