



Universidad **César Vallejo**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Estudio del Bicarbon como Agente Estimulante para la
Biorremediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos de
Petróleo: Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

Apaza Roque, Dante Edy (ORCID: 0000-0003-3680-4898)

Díaz Valenzuela, Emerson (ORCID: 0000-0003-2455-8888)

ASESOR:

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo (ORCID: 0000-0001-6017-1192)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios, mi esposa que sus esfuerzos son impresionantes y su amor es para mí invaluable junto con mis hijos Kevin y Marck quienes han creído en mí siempre dando ejemplo de superación y sacrificio.

Edy Dante Apaza Roque

A mis padres; por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, me formaron con reglas, principios y amor a la naturaleza, me motivaron siempre a perseguir mis anhelos de igual manera a mi hermana, tíos y primos.

Emerson Díaz Valenzuela

AGRADECIMIENTOS

A la universidad cesar vallejo que me dio la bienvenida, a mis formadores de gran sabiduría, compañeros, amigos por brindarme su apoyo incondicional, así también este objetivo de culminar mi tesis con éxito profesional

Edy Dante Apaza Roque

A mi Señor de Qoylloritty y al Apu Ausangate que siempre guían mi camino y seguirán iluminando mi sendero constante que es la vida como también a mi familia que siempre me dio el apoyo necesario para poder salir adelante en mi formación profesional.

Emerson Díaz Valenzuela

ÍNDICE DEL CONTENIDOS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| CARÁTULA..... | i |
| DEDICATORIA..... | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | v |
| INDICE DE FIGURAS | v |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | v |
| ÍNDICE DE ABREVIATURAS..... | vi |
| RESUMEN | vii |
| ABSTRACT | viii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| III. METODOLOGIA..... | 16 |
| 3.1 Tipo y diseño de investigación..... | 16 |
| 3.2. Categoría, Subcategoría y matriz de categorización apriorística | 16 |
| 3.3 Escenario de estudio..... | 18 |
| 3.4 Participantes | 18 |
| 3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 18 |
| 3.6. Procedimiento | 19 |
| 3.7 Rigor científico..... | 20 |
| 3.8 Método de análisis de información | 20 |
| 3.9 Aspectos éticos | 21 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 22 |
| V. CONCLUSIONES | 32 |
| VI. RECOMENDACIONES..... | 33 |
| REFERENCIAS | 34 |
| ANEXOS | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 1. Clasificación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos</i> | 5 |
| <i>Tabla 2. Matriz de Categorización Apriorística</i> | 17 |
| <i>Tabla 3. Método de análisis de información</i> | 20 |
| <i>Tabla 4. Eficiencia del uso del biocarbón</i> | 22 |
| <i>Tabla 5. Factores que alteran las propiedades del biocarbón</i> | 27 |
| <i>Tabla 6. Mecanismo de remediación</i> | 30 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1. Composición elemental básica del petróleo crudo</i> | 6 |
| <i>Figura 2. Áreas de América Latina y el Caribe amenazadas por hidrocarburos aromáticos policíclicos</i> | 7 |
| <i>Figura 3. Generación y contaminación de los HAP</i> | 8 |
| <i>Figura 4. Remediación del suelo mediante biocarbón</i> | 9 |
| <i>Figura 5. Efectos del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas del suelo</i> | 10 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Gráfico 1. Procedimiento de selección de artículos al estudio</i> | 19 |
|----------------------------------------------------------------------|----|

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad determinar el análisis del estudio del biocarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo; para lo cual se aplicó una metodología cualitativa de diseño narrativo; donde mediante el uso de la técnica de análisis documental se pudo seleccionar 26 artículos científicos a nivel mundial, los cuales pasaron previamente por un proceso de selección; obteniendo lo siguiente.

La comparación de la eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo es mayor cuando se emplea la adición del biocarbón; también el efecto de aplicar biocarbón y carbón activado en suelos contaminados con hidrocarburos demuestra que la eliminación de TPH era mayor en suelos enmendados con biocarbón y fertilizante en comparación con suelos enmendados con carbón activado y fertilizante. Los factores que alteran las propiedades del biocarbón son los relacionados con la producción, relacionados con la aplicación y relacionados con contaminantes; donde los factores relacionados con la producción pueden ser el tipo de materia prima, temperatura de pirólisis, tiempo de residencia y tamaño de partícula) pueden afectar la remediación porque determinan las propiedades del biocarbón. El mecanismo de remediación del biocarbon depende de la interacción del biocarbón en la remediación de suelos contaminados; donde el mecanismo de remediación del biocarbon como agente estimulante se clasificaron en bioestimulación y sorción; siendo que la bioestimulación es el mecanismo que presenta mejores resultados, pero no se aplica en mayor cantidad en comparación con la sorción.

Palabras clave: biocarbon, sorción, pirólisis, hidrocarburos, suelo, contaminación, biorremediación

ABSTRACT

The purpose of this research work was to determine the analysis of the study of biochar as a stimulating agent for the bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons; for which a qualitative methodology of narrative design was applied; where through the use of the documentary analysis technique it was possible to select 26 scientific articles worldwide, which previously went through a selection process; obtaining the following.

The comparison of the efficiency of the bicarbon amendment added to the soil is greater when the addition of biochar is used; also the effect of applying biochar and activated carbon in soils contaminated with hydrocarbons shows that the elimination of TPH was greater in soils amended with biochar and fertilizer in comparison with soils amended with activated carbon and fertilizer. The factors that alter the properties of biochar are production related, application related and contaminant related; where production related factors can be feedstock type, pyrolysis temperature, residence time and particle size) can affect remediation because they determine the properties of biochar. The remediation mechanism of bicarbon depends on the interaction of biochar in the remediation of contaminated soils; where the remediation mechanism of bicarbon as a stimulating agent was classified in biostimulation and sorption; being that biostimulation is the mechanism that presents better results, but it is not applied in greater quantity compared to sorption.

Keywords: biocarbon, sorption, pyrolysis, hydrocarbons, soil, contamination, bioremediation

I. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son compuestos orgánicos apolares omnipresentes en el medio ambiente y liberados debido a actividades antropogénicas a través de emisiones y vertidos (Arroyo S. et al., 2021, p.1). Los hidrocarburos del petróleo (PHC) son una categoría importante de contaminantes ambientales en los países industrializados (Yang Lu et al., 2021, p.2).

Aunque el petróleo suministra la mayor parte del consumo energético mundial durante los procesos de exploración, extracción, refinado, transporte y comercialización de productos petrolíferos, una superficie cada vez mayor de tierras ha sido gravemente contaminada por los PHC en el mundo (Sun Kailun et al., 2021, p.3).

La creciente actividad industrial fomenta la degradación del medio ambiente, debido a la acumulación excesiva de sustancias nocivas como los metales pesados o los hidrocarburos del petróleo en los ecosistemas acuáticos y del suelo (Xi et al., 2018, p.1).

Esto se ha vuelto en un grave problema por las actividades antropogénicas, como la extracción y las fugas accidentales durante el transporte que dan lugar a la contaminación por hidrocarburos que amenaza la salud pública y medioambiental debido a su toxicidad, carcinogenicidad y mutagenicidad (Kang Fuxing et al., 2017, p.2).

Los hidrocarburos de petróleo representan uno de los contaminantes del suelo más comunes, cuya presencia representa un riesgo significativo para la biota del suelo y la salud humana (British Petroleum, 2020, p.1). A nivel mundial los hidrocarburos han incrementado su consumo en un 0,83% a 3,19% anualmente entre los años 2009 y 2019. En Europa, la contaminación por hidrocarburos representa más del 30% de los sitios contaminados y en Australia el 40% del total presenta contaminación de suelos (Alfaro Aristides y Denyer Percy, 2021, p.4).

Como consecuencia, la exposición a partículas de polvo que contienen compuestos de HAP está relacionada con graves consecuencias para la salud, incluido el aumento al riesgo de cáncer en adultos y niños (Al Harni Meshari et al., 2021, p.3).

La acumulación de PHC en el medio ambiente está amenazando la salud humana y la seguridad de los ecosistemas, incluyendo la inhibición del crecimiento de las plantas, destruir las estructuras del suelo y dañar la calidad de las aguas subterráneas (Ancione Giuseppa et al., 2021, p. 2). Por lo tanto, la remediación de los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se está convirtiendo en uno de los temas más candentes en el campo de la ciencia y la ingeniería medioambiental (Qu Yajing et al., 2020, p.1).

Por lo tanto, se necesitan estrategias de remediación rentables, respetuosas con el medio ambiente y sostenibles para eliminar los contaminantes de hidrocarburos de los suelos (Zhang Xiao et al., 2021, p.1).

El uso de biocarbón como alternativa propuesta a la rehabilitación convencional de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo ha ganado credibilidad en los últimos tiempos debido a su rentabilidad y naturaleza ecológica (Awad Yasser M. et al., 2018, p.3). El biocarbón es el producto carbonoso de diversos tipos de materias usadas, donde pasa por un proceso anaeróbico a elevadas temperaturas dentro de un reactor (Wang Mengjiang et al., 2021, p.2).

El biocarbón impacta en los microbios del suelo, lo que puede resultar en la promoción de la degradación de los hidrocarburos de petróleo en el suelo (Deem L. y Crow S., 2017, p.2).

Es así que, que se presenta como problemática:

¿Cuál es el análisis del estudio del biocarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo?; y como problemas específicos se elaboró:

PE1: ¿Cuál es la comparación de la eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo?

PE2: ¿Cuáles son los factores que alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo?

PE3: ¿Cuál es el mecanismo de remediación del bicarbono como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo?

Y como objetivo general se tiene:

Determinar el análisis del estudio del biocarbono como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo; y los objetivos específicos son:

OE1: Analizar la comparación de la eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo

OE2: Identificar los factores que alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo

OE3: Describir el mecanismo de remediación del bicarbono como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo

Es así que el presente estudio se justifica teóricamente, mediante la recolección de análisis sistemáticos de estudios actualizados aplicando biocarbón como diversas enmiendas, con el interés por brindar una alternativa rentable de naturaleza ecológica y amigable con el ambiente, para biorremediar suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo; brindando un aporte a los futuros investigadores para.

II. MARCO TEÓRICO

La contaminación del suelo se ha convertido en un problema importante a nivel mundial y ha provocado enormes daños irreversibles como el aumento de la tasa de mortalidad, la disfunción del metabolismo normal y la aparición de nuevas enfermedades (Tijani Jimoh O. et al., 2016, p.2). Los hidrocarburos de petróleo representan uno de los contaminantes del suelo más comunes, cuya presencia representa un riesgo significativo para la biota del suelo (Dike Charles C. et al., 2021, p.1).

Siendo los crecientes problemas medioambientales atribuidos a las prácticas inadecuadas de gestión de residuos (Varjani Sunita J. et al., 2018, p.2). Además, el rápido crecimiento industrial y sus unidades asociadas generan voluminosos efluentes y otros desechos que llegan al medio ambiente y que suponen una amenaza potencial para la ecología y el funcionamiento del ecosistema (Gosai Haren B. et al., 2018, p.1).

Estos contaminantes incluyen tintes, residuos plásticos, metales pesados y otros contaminantes emergentes de origen industrial (Rachwall M. et al., 2016, p.2). Los contaminantes orgánicos persistentes (COP), como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los bifenilos policlorados (PCB), los polibromobifenilos (PBB) y otros (Kadri Tayssir et al., 2017, p.2).

Donde, se considera que el origen primario de los HAPs proviene de aportes antropogénicos como la pirólisis industrial y se liberan con las emisiones durante la combustión incompleta de compuestos orgánicos, la licuefacción de combustibles fósiles y la destilación de productos del petróleo (Gitipour Saeid et al., 2018, p.2). Además, los HAP se generan durante la combustión incompleta de sustancias que contienen carbono, como la madera, el carbón, la gasolina y el gasóleo (Lang Firmin S. et al., 2016, p.4).

También encuentran aplicaciones industriales generalizadas, como la producción de medicamentos, tintes, plásticos, pesticidas y herbicidas (Bansal V. y Kim K, 2016, p.3). La Agencia de Protección Medioambiental ha clasificado 16 HAP

diferentes en función de su tendencia a causar problemas medioambientales persistentes, siendo la clasificación descrita en la tabla 1.

Tabla N°1. Clasificación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos

| Clasificación de HAP de acuerdo a la Agencia de Protección Medioambiente |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> -Acenafteno -Acenaftileno -Antraceno -Benz[a]antraceno -Maftaleno -Benzo[a]pireno -Benzo[k]fluoranteno -Benzo[b]fluoranteno -Benzo[ghi]perileno -Criseno -Dibenz[a,h] antraceno -Fluoreno -Indeno[1,2,3-cd] pireno -Fenantreno -Pireno |
| En función de las fuentes |
| <p>A= Biogénicos / los que emanan de las plantas o de las conversiones metabólicas</p> <p>N= Petrogénicos / los que se originan en los petroproductos</p> <p>C= Pirogénicos / los que se deben a la combustión completa o incompleta</p> |

Fuente: Modificado de Gitipour Saeid et al., (2018)

Además, la clasificación se basa en sus pesos moleculares, a saber, bajo peso molecular; LMW-PAHs y alto peso molecular; HMW PAHs. Los compuestos que tienen dos o tres anillos aromáticos se clasifican como HAP de bajo peso molecular: naftaleno (C₁₀H₈; 128,2 g/mol), acenafteno (C₁₂H₁₀; 154,2 g/mol), acenaftileno (C₁₂H₈; 152,2 g/mol), antraceno (C₁₄H₁₀; 178,2 g/mol), fenantreno (C₁₄H₁₀; 178,2 g/mol) y fluoreno (C₁₃H₁₀; 166,2 g/mol) (Wang Jian et al., 2017, p.5).

Así mismo, el petróleo es un líquido inflamable, aceitoso y de origen natural compuesto principalmente de hidrocarburos; Ocasionalmente se encuentra en manantiales o estanques, pero generalmente se obtiene de debajo de la superficie de la Tierra mediante la perforación de pozos (Kuppusamy S. et al., 2017, p.3).

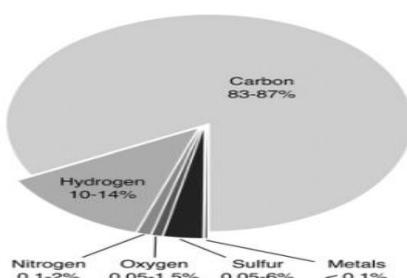
Anteriormente llamado petróleo de roca, el petróleo sin refinar ahora se denomina petróleo crudo (Prakash Bansal O., 2019, p.2).

El petróleo crudo es una mezcla altamente compleja de compuestos, que se extiende desde C6 hasta C60, que incluye hidrocarburos alifáticos (n-alcanos, isoalcanos y cicloalcanos), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y sus derivados alquilados, y compuestos polares, que contiene un bajo porcentaje de azufre y trazas de compuestos de nitrógeno y oxígeno (Borji H. et al., 2020, p.1). Generalmente son llamados resinas, básicamente que consta de compuestos heterocíclicos tales como aromáticos que contienen S, N y O (por ejemplo, derivados de tiofeno, carbazol y fenol) (Abdel Shafy H. et al., 2016, p.4).

Los productos del petróleo (combustibles y productos derivados del petróleo) son el contaminante ambiental más común en la mayoría de los países industrializados (Manisalidis Loannis et al., 2020, p.1). Las fracciones de petróleo más importantes, obtenidas por craqueo o destilación, son diversos gases de hidrocarburos (butano, etano y propano), nafta de varios grados, gasolina, queroseno, fuelóleos, gasóleo, aceites lubricantes, cera de parafina y asfalto (Balcioglu Esra B., 2016, p.2).

El petróleo (también llamado petróleo crudo) exhibe una amplia gama de propiedades físicas que deben determinarse antes de que el petróleo se envíe a una refinería para producir una variedad de productos, especialmente los combustibles a base de petróleo (Sancho Andre et al., 2020, p.2). El petróleo se compone principalmente de hidrocarburos, aunque también están presentes derivados de hidrocarburos que contienen oxígeno, nitrógeno o azufre. Además, algunos metales están presentes en niveles traza. (Ver figura 1).

Figura N°1. Composición elemental básica del petróleo crudo

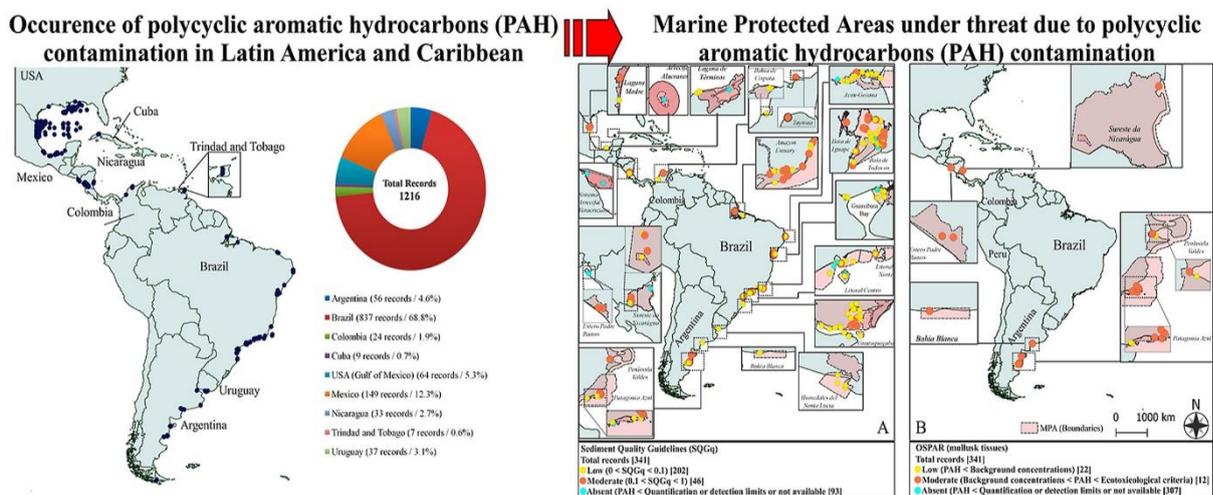


Fuente: Speisht J. G., (2018)

Las diferentes fuentes de petróleo exhiben diferentes composiciones, sin embargo, las principales clases de hidrocarburos (alcanos [parafinas], cicloalcanos [naftenos] y aromáticos), se encuentran en todas las fuentes de petróleo crudo (Oladi Ma. Y Shokri M., 2021, p.1). Aunque la composición del petróleo crudo varía de un lugar a otro, e incluso dentro de un solo pozo, la composición elemental básica del petróleo crudo muestra poca variación de una fuente a otra (Fernandes Leao J. et al., 2016, p.3).

Así mismo, el gasóleo es un combustible derivado del petróleo que contiene hidrocarburos polirománticos (HAP), y el gasóleo es una fuente de HAP para el medio ambiente (De Santana C. et al., 2021, p.2). Pero de acuerdo con las concentraciones reportadas en la biota, pueden ocurrir efectos nocivos ocasionales sobre los organismos de las Reservas de la Biosfera. Como se muestra en la figura 2.

Figura N°2. Áreas de América Latina y el Caribe amenazadas por hidrocarburos aromáticos policíclicos



Fuente: Nunes Beatriz Z. et al., (2021)

Estos residuos se han observado frecuentemente en concentraciones capaces de inducir efectos deletéreos en la biota marina, incluyendo desequilibrios hormonales, alteraciones reproductivas, estrés oxidativo, genotoxicidad, mortalidad y daños poblacionales (Abessa Denis M. et al., 2018, p.1). Dichos efectos, pueden llevar a impactos en niveles organizativos superiores dañando las comunidades naturales

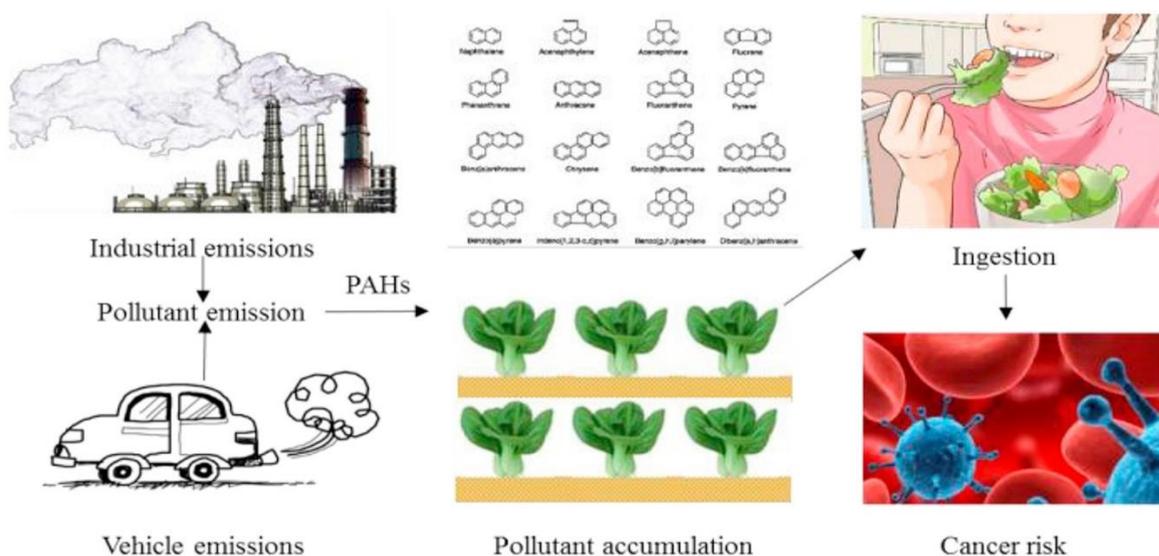
y los ecosistemas incluso planteando riesgos para la salud humana (Aguirre Rubí J. et al., 2019, p.2).

Es así que, también debido a la presencia de componentes de hidrocarburos de petróleo en el suelo, la superficie de las partículas del suelo se cubre con una fina película aislante (Turaki Usman A. et al., 2021, p.2). Algunas fracciones del petróleo pueden disolver las membranas celulares y, en consecuencia, alterar la estructura de las raíces de las plantas (Gao Huan et al., 2021, p.4).

Estos compuestos xenobióticos poseen una mayor afinidad hacia varios participantes de los ciclos biogeoquímicos, acumulándose finalmente en los componentes bióticos y abióticos, causando así daños insustituibles a los ecosistemas, así como interfiriendo en las cadenas alimentarias (Embrandiri Asha et al., 2016, p.2). Son semi volátiles, relativamente inertes y suelen ser incoloros parece ser en sólidos de color amarillo pálido con muy baja solubilidad en agua, altos puntos de fusión y ebullición con baja presión de vapor (Cerniglia Carl E. et al., 2017, p.2).

Así mismo, el consumo dietético de verduras contaminadas puede contribuir a la exposición de los seres humanos a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como se muestra en la figura 3.

Figura N°3. Generación y contaminación de los HAP



Fuente: extraído de Jia Jinpu et al., (2018)

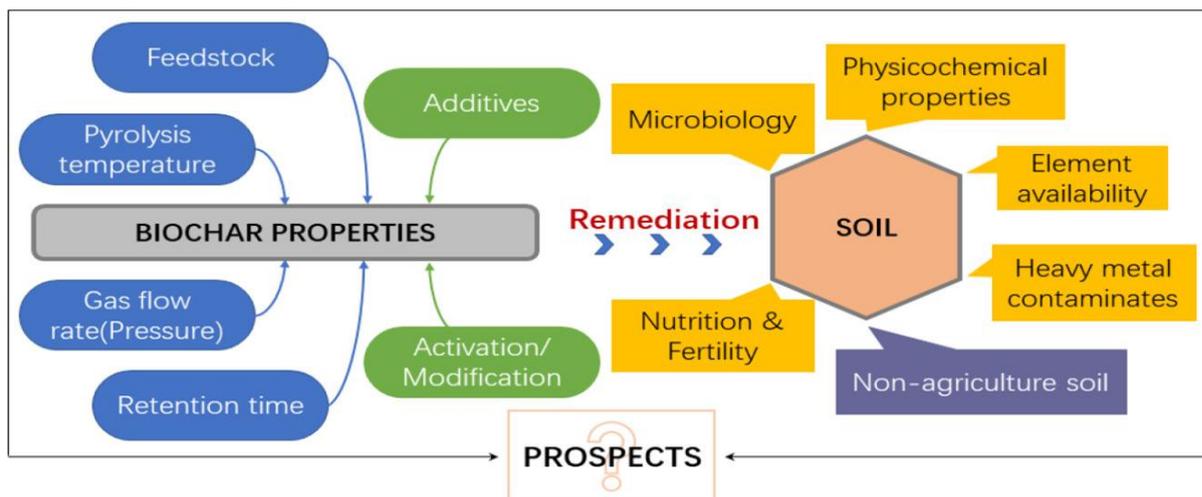
El consumo alimentario es una de las principales vías de exposición a los HAP, que puede suponer más del 70% de la exposición total en individuos no fumadores (Wang Li et al., 2018, p.2). Es así que numerosos estudios han caracterizado los HAP en la atmósfera y el suelo y han asociado los HAP con los riesgos para la salud (Niu Xinyi et al, 2017, p.1).

La eliminación de los HAP del suelo contaminado es siempre un reto, ya que la hidrofobia de los HAP, así como la fuerte afinidad con la materia orgánica conduce a su persistencia, haciéndolos menos disponibles para los múltiples tratamientos físicos, químicos y biológicos (Hiremath Pavan et al., 2016, p.2).

A causa de ello, los desafíos asociados con el uso de métodos existentes han llevado a la búsqueda continua de técnicas más nuevas y sostenibles (ecológicas y rentables) (Zama Eric F. et al., 2018, p.1). Siendo el uso del biochar una de las técnicas que han llamado la atención en los últimos tiempos en la remediación de suelos se encuentra el uso de biocarbón (Kumar Abhay et al., 2018, p.1).

Aunque el término científico "biochar" parece ser reciente, su origen está relacionado con la creación de Terra preta por la antigua población amerindia utilizando técnicas de slash and char (Varjani Sunita et al., 2019, p.2).

Figura N°4. Remediación del suelo mediante biocarbón

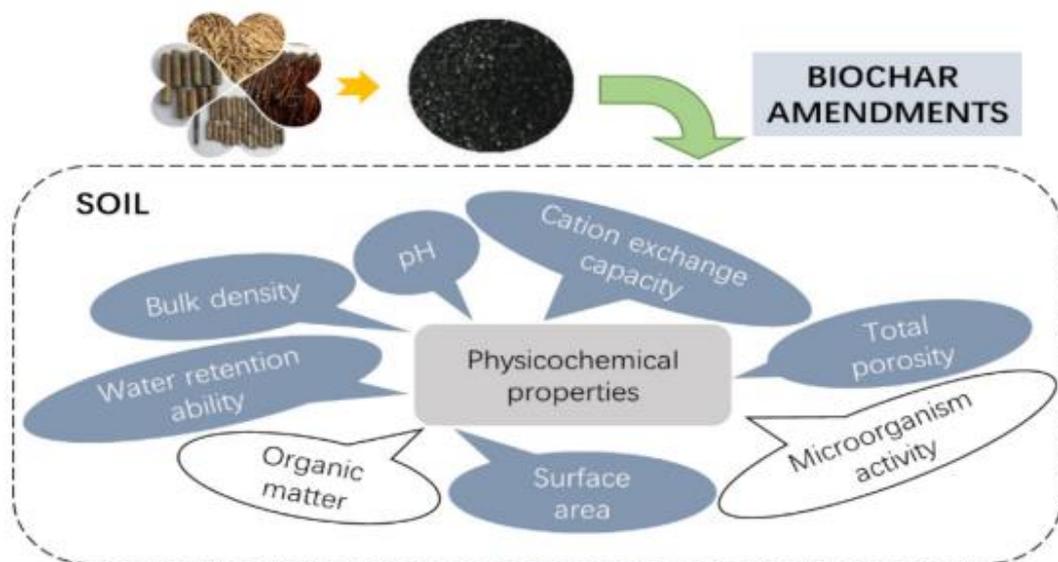


Fuente: Yua Peng et al., (2019)

La aplicación de biocarbón podría ajustar la estructura del suelo (área de superficie, tamaño de poro y distribución, etc.), mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de retención de agua, etc.) y mejorar la absorción de nutrientes del suelo para el crecimiento de las plantas (Zhang Guixiang et al., 2017, p.2). Además, también se puede utilizar para adsorber diversos contaminantes (metales pesados, materias orgánicas), modificar el hábito y la función de los microorganismos y mitigar el problema climático cambiando la biodisponibilidad de elementos (C, N, K, etc.) en el suelo (Koltowski Michael et al., 2016, p.2). Como se observa en la figura 4.

Como se presenta en la Fig. 5, las enmiendas de biocarbón podrían considerarse como acondicionadores del suelo a través del cambio de las propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como el aumento del pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CEC) y la amortiguación del suelo (Safaei Khorram M. et al., 2016, p.2).

Figura N°5. Efectos del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas del suelo



Fuente: Safaei Khorram M. et al., (2016)

El biocarbón también puede mejorar la estructura de los suelos a través de la mejora del crecimiento de las plantas por encima y por debajo del suelo y de algunos procesos de construcción de estructuras que, en última instancia, influyen en los procesos del área de las raíces y en la actividad de los microorganismos del

suelo (Wang Mingming et al., 2018, p.3). Así mismo, el biocarbón, mejora la agregación y aumentó la conductividad hidráulica saturada de las tierras de cultivo principalmente a través del aumento del contenido de Ca en el suelo (Luo Shasha et al., 2017, p.2).

Pero, los efectos del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas de los suelos degradados varían según el tipo de suelo y de materia prima, la tasa de aplicación y el envejecimiento del biocarbón con el suelo (Obia Alfred et al., 2016, p.2).

Se presentan también los antecedentes a nivel internacional:

Galitskaya P. et al., (2016), probó cuatro estrategias de biorremediación de suelos contaminados con petróleo en el laboratorio durante un período de 84 días: (A) aireación y humectación; (B) enmienda con 1% de biocarbón (p / p) en combinación con A; enmienda con biocarbón al 1% con *Pseudomonas aeruginosa* (C) o *Acinetobacter radioresistens* inmovilizados(D) en combinación con A., donde todas las estrategias utilizadas dieron como resultado una disminución del contenido de hidrocarburos, mientras que la adición de biocarbón (estrategias B, C, D) condujo a la aceleración de la descomposición al principio. Concluyendo que, la diversidad alfa más baja se observó en las muestras con bacterias introducidas el primer día de remediación.

Wang Yanjie et al., (2017), presentó como objetivo de estudio determinar la eficiencia de remediación de suelos contaminados con petróleo de un campo petrolífero utilizando diferentes tipos de tratamientos de remediación en condiciones de laboratorio. Donde, el grado de degradación de los hidrocarburos se controló gravimétricamente y las fracciones de aceite residual se analizaron mediante cromatografía de gases y la degradación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y las principales fracciones de hidrocarburos fue mayor en T3 y T4, especialmente en T4, que en T1 y T2. Las intensidades de la fracción n-alcano, los esteranos C27-C29 y los homohopanos C33-C35 se redujeron de manera eficiente en T4 en comparación con los otros tratamientos. Concluyendo según a los resultados, que el suelo contaminado con petróleo puede remediarse de manera eficiente agregando biocarbón y nutrientes simultáneamente, y esta combinación de remediación fue superior a la observada con la adición de polvo de paja de junco.

Zhang Guixiang et al., (2018), presentó como metodología experimental de estudio biocarros derivados de residuos vegetales de cáscara de nuez, mazorca de maíz, paja de maíz y paja de arroz obtenidos a tres temperaturas de tratamiento térmico (HTT) (250 ° C, 400 ° C y 600 ° C), donde se aplicaron en un experimento de incubación para investigar cómo Las materias primas, los HTT y las propiedades del biocarbón afectan la cantidad de microorganismos , el cambio de la comunidad microbiana , la actividad enzimática y la biodegradación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en un suelo contaminado envejecido. Dando como resultados, que las cantidades microbianas (bacterias y hongos) y las actividades enzimáticas (catecol 2,3-dioxigenasa y enzimas ligninolíticas) generalmente disminuyeron con el aumento de HTT. Concluyendo que, en general, la aplicación de biocarros tuvo poca influencia en las tasas de biodegradación de los HAP totales. Sin embargo, los efectos de los biocarros sobre las tasas de biodegradación de los principales HAP individuales (p. Ej., Nap, Phe, Pyr y Chr) dependían tanto de los tipos de biocarros como de las propiedades de los HAP, como el número de anillos de benceno y el patrón angular del enlace del anillo.

Uyizeye Olivia et al., (2019), en su estudio utilizó un experimento de mesocosmos para evaluar los efectos del biocarbón y las enmiendas de compost de origen local y producido por la comunidad en suelos contaminados con diesel. Donde después de 90 días del experimento se cuantificó los efectos de las enmiendas sobre los hidrocarburos totales de petróleo (C9-C40) (TPH) y el pH del suelo, la materia orgánica, la estabilidad de los agregados, la respiración del suelo, el fósforo extraíble, el potasio extraíble y los micronutrientes. (Mg, Fe, Mn y Zn), observando que existía una degradación de TPH significativamente mayor en suelos modificados con compost que en los controles y suelos modificados con biocarbón. Concluyendo que la adición de compost mejoró la biodegradación del TPH al aumentar el contenido de nutrientes del suelo y la actividad microbiana. Nuestros resultados sugieren que el compost accesible a la comunidad puede mejorar la biodegradación del TPH y que la implementación es posible a nivel comunitario.

Li Xiaona et al., (2019), realizó un estudio para investigar los efectos combinados de los exudados de las raíces y el biocarbón en la disipación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y en las estructuras de la comunidad microbiana en

el suelo. Donde, como componente principal de los exudados de las raíces del raigrás, el ácido oxálico (OA) mejoró significativamente la disipación de los HAP de anillos altos y bajos en el suelo estudiado con o sin enmienda de biocarbón de paja de maíz. Sin embargo, el biocarbón solo mejoró solo la disipación de HAP de anillo alto. Las actividades de tres enzimas (ureasa, polifenol oxidasa y deshidrogenasa) fueron las más altas en el suelo modificado con biocarbón de paja de maíz y 0,5 mg kg⁻¹ de OA. Además, la biomasa microbiana del suelo y la abundancia de géneros y genes asociados con la degradación de PAH mejoraron significativamente con la aplicación en tándem de biocarbón y OA ($p < 0.05$). Concluyendo que, los resultados de este estudio sugirieron que un enfoque combinado de biocarbón-rizosfera debería ser una estrategia de remediación viable para suelos contaminados con HAP.

Abbaspour Ali et al., (2020), en su investigación planteó como objetivo de estudio alcanzar una técnica eficiente para la remoción o reducción de los efectos nocivos causados por los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en los suelos. Y se realizó como metodología, donde en un experimento de invernadero, el efecto del biocarbón (B), las micorrizas (M) y la combinación de micorrizas y biocarbón (M + B) sobre el crecimiento de dos especies nativas; trébol (*Trifolium arvense*) y malva (*Malva sylvestrisL.*), y se estudiaron la eficiencia de remoción de TPH (16.79 mg kg⁻¹) de un suelo contaminado con aceite. Dando como resultado, que los análisis de plantas después de 50 días de período de crecimiento mostraron un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en el peso seco de los brotes de malva en los tratamientos B y M + B, pero no se observó ningún efecto significativo para el trébol en comparación con el control (C). La concentración inicial de TPH, determinada por la técnica de cromatografía de gases, se redujo desde el 9,4% en suelo no plantado hasta el 56,4% (trébol) y el 55,9% (malva) en el tratamiento M + B.

Mukome Fungai Nd. Et al., (2020), en su estudio, los suelos impactados por petróleo crudo de tres lugares separados se modificaron con fertilizantes y agentes de carga que consisten en biocarros derivados de cáscaras de nueces o astillas de madera de pino ponderosa producidas a 900 ° C. Donde, los reactores discontinuos se incubaron a 25 ° C y se tomaron muestras a intervalos predeterminados para medir los cambios en los hidrocarburos de petróleo totales (TPH) a lo largo del

tiempo. Durante la duración de la incubación, el contenido de humedad del suelo se ajustó al 75% de la capacidad máxima de retención de agua (MWHC) y antes de cada evento de muestreo, la muestra se agitó manualmente. Concluyendo que, los resultados muestran que la adición de fertilizantes y agentes de carga aumentó las tasas de biodegradación de TPH.

Barati Maryam et al., (2017), realizó su estudio para investigar el efecto de las plantas de cebada y avena y el biocarbón de estiércol de aves de corral sobre la degradación de los hidrocarburos de petróleo totales (TPH) y la respiración microbiana a niveles de 4, 6 y 8% de TPH en el suelo. Donde, los resultados mostraron que con el aumento de los niveles de TPH, el crecimiento de las plantas y la degradación de los TPH se redujeron significativamente; sin embargo, la presencia de plantas en suelos contaminados y la aplicación de biocarbón aumentaron significativamente la degradación de los TPH y la tasa de respiración microbiana; y el porcentaje de reducción de TPH en suelos cultivados con cebada y avena fue aproximadamente 1.02 y 0.75 veces mayor que el suelo sin sembrar. Concluyendo que, la cebada y la avena parecen ser adecuadas para la degradación de los TPH, y el biocarbón es una enmienda útil para mejorar la degradación de los TPH en este suelo.

Zhang Guixiang et al., (2020), presenta en su estudio la aplicación de doce tipos de biocarbón en un suelo muy contaminado de una planta de coquización para obtener información sobre el mecanismo responsable de la respuesta microbiana a la adición de diferentes tipos de biocarbón en el suelo y la eliminación por biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Dando como resultados, que la adición de biocarros a los suelos aumentó los porcentajes de biodegradación de los HAP individuales entre un 3,0 y un 60,3% en comparación con los del control. Entre estos biocarbón, el biocarbón derivado de paja de arroz pirolizado a 600 ° C (RS6) degradó eficazmente los HAP del suelo, con un aumento de los porcentajes de biodegradación de HAP individuales del 40,00% al 58,84%. Concluyendo de estos resultados, que se atribuyó a que se detectaron géneros relacionados con *Acidobacteria* sustancialmente específicos en suelos tratados con RS6, lo que contribuyó a la biodegradación efectiva de los HAP. Respectivamente,

Kong Lulu et al., (2018), se aplicaron biocarros de aserrín y paja de trigo preparados a 300 ° C y 500 ° C a suelo contaminado con petróleo para una incubación de 84 días para estimar su efectividad en la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Donde los resultados muestran que, los biocarros solos fueron los más eficaces para reducir el contenido de HAP, además, se detectó una reducción significativa en el contenido de HAP al agregar biocarbón preparado a alta temperatura (500 ° C), mientras que las materias primas de biocarbón mostraron poco efecto sobre la eliminación de PAH. Concluyendo, que debido a la alta hidrofobicidad de los anillos aromáticos, se encontró que los HAP de alto peso molecular eran mucho más resistentes a la degradación microbiana en comparación con los HAP de bajo peso molecular.

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

Este trabajo presenta una investigación cualitativa, según Hernández (2014) este enfoque no presenta una línea secuencial en el proceso o en el desarrollo de la investigación, es decir, se puede tomar más información durante el camino e ir cambiando o generando más interrogantes a la problemática. Se puede tener nuevas ideas o hipótesis incluso después de la recolección de datos. El enfoque cualitativo nos va a permitir comprender los hechos en su campo natural y captar las perspectivas de quienes participaron en los hechos.

El tipo de investigación trabajado en este informe es aplicado, ya que busca consolidar las informaciones o investigaciones obtenidas hasta el momento con el fin de dar soluciones a ciertas problemáticas para el desarrollo del campo que se va a tratar.

El diseño es narrativo, se hizo uso de artículos científicos, a través, de la información extraída y usada en esta investigación lo que se hace es interpretar y entender cómo ocurrieron los hechos o fenómenos estudiados y usados para este informe contextualizando el lugar y tiempo (Hernandez,2014).

3.2. Categoría, Subcategoría y matriz de categorización apriorística

Las categorías y sub categorías del presente proyecto fueron planteados a base de los problemas y objetivos específicos; los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N°2. Matriz de Categorización Apriorística

| Objetivos específicos | Problemas específicos | Categoría | Subcategoría | Criterio 1 | Criterio 1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Identificar la eficiencia de la enmienda del bicarbon agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo? | ¿Cuál es la eficiencia de la enmienda del bicarbon agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo? | Eficiencia de la enmienda del bicarbon agregada al suelo Safaei Khorram M. et al., (2016, p.2) | Con biocarbón <hr/> Sin biocarbón <hr/> Wang Mingming et al., (2018, p.3). | De acuerdo al tiempo de residencia | De acuerdo a la temperatura de elaboración del biocarbón |
| Determinar los factores que alteran las propiedades del biocarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo | ¿Cuáles son los factores que alteran las propiedades del biocarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo? | Factores que alteran las propiedades del biocarbon. Zhang Guixiang et al., (2017, p.2) | Tipo de MP <hr/> T° de pirólisis <hr/> Tamaño de partícula <hr/> Método de aplicación <hr/> Zama Eric F. et al., (2018, p.1). | De acuerdo a la descripción de cada factor | De acuerdo a las fuentes que lo describen |
| Clasificar los mecanismos de remediación | ¿Cuáles son los mecanismos de remediación del bicarbon | Mecanismos de remediación del bicarbon como | Bioestimulación <hr/> Biosorción | De acuerdo a las características | De acuerdo a la disminución de la biodisponibilidad de los |

| | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| del bicarbonato como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo | como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo ? | agente estimulante Kumar Abhay et al., (2018, p.1) | Hiremath Pavan et al., (2016, p.2). | ica de la adsorción de hidrocarburos |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|

Fuente: Elaboración propia

3.3 Escenario de estudio

El ambiente de estudio se observa en el tiempo real donde suceden los experimentos, en este caso el escenario de estudio se tornará dentro de las literaturas usadas para el presente trabajo, es así que cada escenario que se encontró en los análisis de la información durante el proceso de investigación será el escenario de estudio al ser una revisión sistemática.

3.4 Participantes

A través de plataformas como bibliotecas virtuales, portales web y otros se obtuvo o se extrajo información para el uso y la consolidación del presente informe; estos son: Scielo, Scencedirect y Redalyc a estas fuentes se les considera como los participantes.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

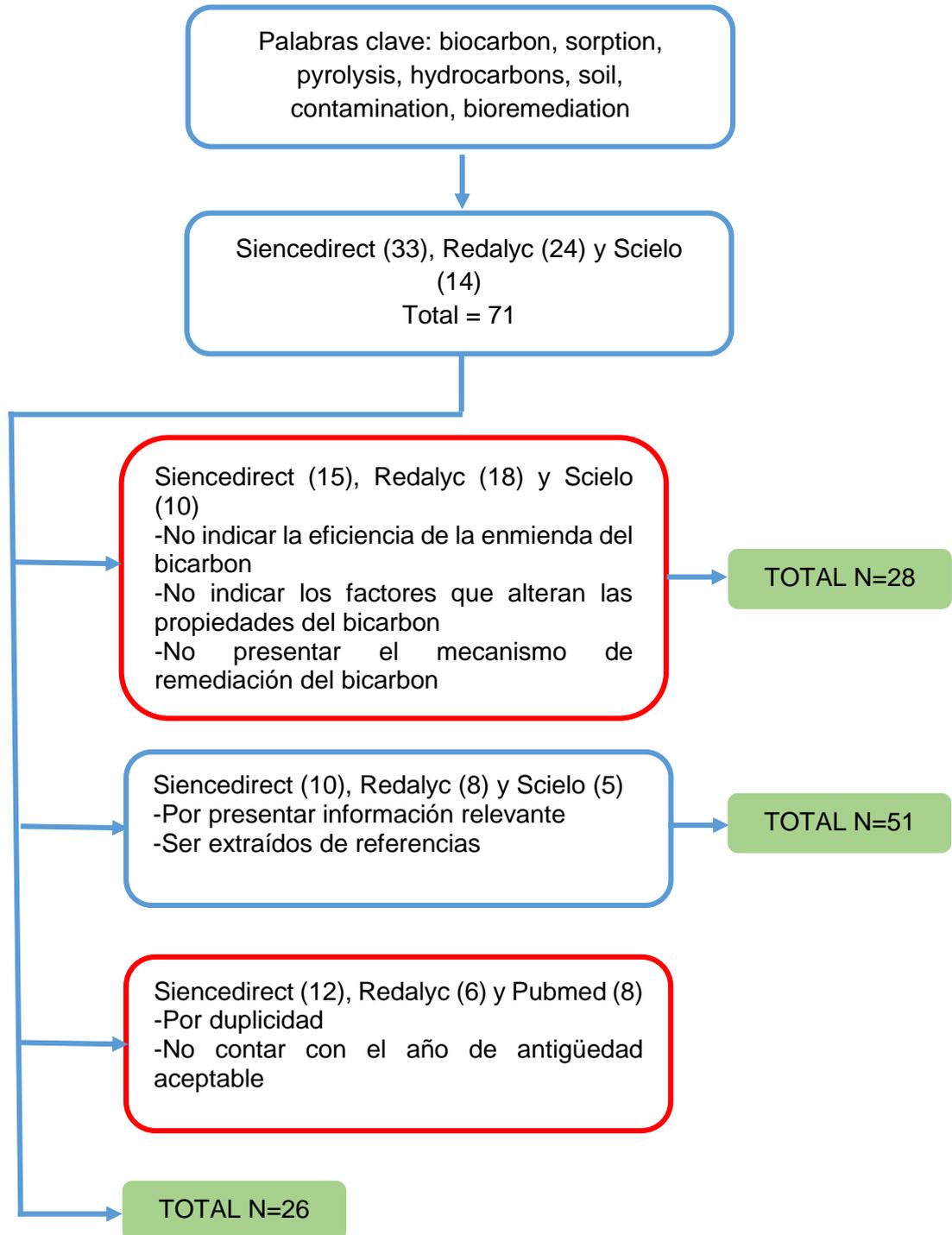
Se aplicó la técnica de análisis documental, esta nos permite crear un documento secundario de la información original a través del análisis de la información para terminar de sintetizarla y que permita al usuario poder usarlo como intermediario al solicitar una información. En esta investigación a través de la información extraída de diferentes artículos científicos hemos podido obtener y sintetizar información que representa a todas las literaturas usadas.

El instrumento de recolección de datos usado fue la ficha de análisis de contenido esta nos permitió hacer la técnica de análisis documental.

3.6. Procedimiento

El procedimiento para la selección de los artículos es descrito a continuación:

Gráfico N°1. Procedimiento de selección de artículos al estudio



3.7 Rigor científico

El rigor científico nos permite obtener una investigación que tenga credibilidad y validación de su información. Castillo E. y Vásquez M.L (2003) nos dicen que para la evaluación de una investigación con respecto a calidad se usan tres criterios comúnmente, estos son:

La credibilidad, donde los resultados obtenidos al ser mostrados son reconocidos por las personas que fueron estudiadas en las investigaciones y estas las reconocen como lo que verdaderamente sienten o piensan y han sido plasmados como tal fueron expuestos. Este criterio se puede encontrar a través de la información dada en el presente informe ya que el lector que ha estado en contacto con el fenómeno estudiado podrá reconocer lo que se a plasmado en los resultados.

La confirmabilidad, este criterio se refiere al investigador donde este debe seguir la ruta de los datos para llegar y obtener conclusiones congruentes con la investigación principal, donde los resultados podrían ser corroborados a través o siguiendo otras informaciones que se hayan desarrollado en el mismo contexto.

La transferibilidad, este criterio nos lleva a aplicar los resultados de una investigación o la aplicación de esta a otro contexto, para esto se necesita una mayor descripción del campo donde fue desarrollada la investigación para tener la capacidad de aplicarla en otro contexto.

3.8 Método de análisis de información

El método usado en esta investigación es la matriz apriorística, el cual se divide en categorías y sub categorías de acuerdo a los objetivos específicos, los cuales generan la búsqueda de las siguientes categorías y sub categorías.

Tabla N°3. Método de análisis de información

| <i>Categoría</i> | <i>Subcategoría</i> |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Eficiencia de la enmienda del bicarbon agregada al suelo</i> | Con biocarbón |

Factores que alteran las propiedades del bicarbon.

Sin bbiocarbón

Tipo de MP

T° de pirólisis

Tamaño de partícula

Método de aplicación

Mecanismos de remediación del bicarbon como agente estimulante

Bioestimulación

Biosorción

Elaboración propia

3.9 Aspectos éticos

En el presente trabajo de investigación se usaron los siguientes aspectos éticos:

Normativa vigente establecida por la universidad Cesar Vallejo Filial Lima, respeto del código de ética.

Norma ISO 690, respeto a la autoría siendo reflejada en cada referencia plasmada dentro del trabajo de investigación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se demuestra mediante la comparación del porcentaje de remoción de los hidrocarburos con y sin un tratamiento de biocarbón, donde se demuestran los resultados en la tabla 4.

Tabla N°4. Eficiencia del uso del biocarbón

| TIPOS DE RESIDUOS | BIOMASA | CONTAMINANTE | TEMP. (°C) | TIEMPO DE RESIDENCIA (HORA) | EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN (%) | | TIEMPO (DÍAS) | AUTOR (ES) |
|--------------------|-----------------|--------------|------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| | | | | | Tratamiento sin biocarbón | Tratamiento con biocarbón | | |
| RESIDUOS AGRÍCOLAS | Residuos abedul | de Aceite | 450 | – | 56% | 59.0 | 84 | Galitskaya O. et al., 2016 |
| | Paja espadaña | de Petróleo | 300 | 3 | 28.2% | 47% | 56 | Wang Yanjie et al., 2017 |
| | Elote | HAP | 400 | 4 | 42% | 40% | 30 | Zhang et al., 2018 |
| | | HAP | 600 | 4 | 42% | 27% | 30 | |
| paja de maíz | HAP | 500 | – | 39,3% | 48% | 21 | Li Xiaona et al., 2019 | |

| | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|-----|-----|-------|------------|-----------------------|----------------------------|
| | hojas de roble | Aceite | 500 | 12 | 9.4% | 26% | 50 | Abbaspour Ali et al., 2020 |
| | cáscaras de plátano | Aceite | 350 | 5 | 22% | 44,4–65,1% | 28 | Agarry Samuel et al., 2016 |
| | Residuos de verduras/frutas | Diesel | 550 | 2 | 36% | 72.3% | 180 | Aziz Sadia et al., 2020 |
| | cáscara de nuez | HAP | 250 | 4 | 42% | 30,3% | 30 | Zhang |
| HAP | | 400 | 4 | 42% | 36% | 30 | Guixiang et al., 2018 | |
| HAP | | 600 | 4 | 42% | 12,4% | 30 | | |
| | Paja de trigo | HAP | 500 | 3 | 27.7% | 53% | 84 | Kong Lulu et al., 2018 |
| | | HAP | 300 | 3 | 27.7% | 48,3% | 84 | |
| | Paja de trigo | Aceite | 450 | 1 | 36% | 33.5% | 90 | Han Tao et al., 2016 |
| | Biocarbón (B) y compost (CP), residuos de hongos (M) y paja de maíz (Y) | HAP | – | – | 58% | 61.4% | 77 | Bao Huanyu et al., 2020 |
| | Biocarbón (B) | Aceite | 500 | – | 53% | 76% | 110 | Brown David et al., 2017 |
| | Hongo gastado | Petróleo | 550 | 3 | 8.7% | 30% | 60 | Zhang Bofan et al., 2019 |
| ESTIERCOL | | Petróleo | 400 | 4 | 22.1% | 23% | 140 | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------|---------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-----------------------------|
| FORESTALES | estiércol de aves de corral | Petróleo | | | 16.7% | 17% | 140 | Barati Maryam et al., 2017 | |
| | | Petróleo | | | 13% | 14% | 140 | | |
| | | HAP | 600 | 4 | | 2.9% | 50% | 180 | Zhang Guixiang et al., 2020 |
| | Aserrín | HAP | 300 | 3 | | 27.7% | 48% | 84 | Kong Lulu et al., 2018 |
| | | HAP | 500 | 3 | | 27.7% | 56% | 84 | |
| | Leña de madera dura | Diesel | 400–430 | 10–12 | | 52.5% | 53% | 90 | Uyizeye Olivia et al., 2019 |
| | Pino ponderosa | Aceite | 900 | – | | 39.4% | 68% | 60 | Mukome et al., 2020 |
| | | Aceite | 900 | – | | 39.4% | 61% | 60 | Fungai et al., 2020 |
| ESTIERCOL Y LODOS | Estiercol de vaca | Diesel | 550 | 2 | | 35,9% | 82% | 180 | Aziz Sadia et al., 2020 |
| | Digerido de lodos de depuradora | Aceite | 350 | 0.25 | | 9,8% | 10,5% | 30 | Gielnik Anna et al., 2019 |
| | | Aceite de motor | 350 | 0.25 | | 25,4% | 24,5% | 30 | |

Elaboración propia

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4 se tiene que la eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo es mayor cuando se emplea la adición del biocarbón, siendo ello corroborado por el 80% de los investigadores.

Kong et al. (2018) en su estudio estudió el efecto del 5 % (p/p) de biocarbón de paja de trigo y aserrín en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclic, descubriendo que la aplicación de biocarbón mejoró significativamente la eliminación de PAH (alrededor de 47,9 a 55,7 %) en comparación con el tratamiento no modificado (27,7 %).

También, Aziz Sadia et al., (2020), en el grupo de las enmiendas de estiércol y lodos encontró que varias enmiendas de biocarbón podrían aumentar significativamente la tasa de biodegradación de hidrocarburos con eficiencias de eliminación > 70 % y que el bioaumento con estiércol de vaca mejoró aún más la eficiencia de eliminación hasta el 82 %; pudiendo así afirmar que las enmiendas de biochar tienen un gran potencial para mejorar la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de rango diesel.

Así mismo, ello es respaldado por, otros investigadores que aplicaron biocarbón y realizaron una comparación de la eficiencia en presencia y ausencia; donde se encontró que la eliminación de TPH era mayor en suelos enmendados con biocarbón y fertilizante (44 %) en comparación con suelos enmendados con carbón activado y fertilizante (29 %) (Brown David et al., 2017).

Lo que es corroborado por lo expuesto por Aziz Sadia et al., (2020), quien señala que su estudio encontró que varias enmiendas de biocarbón podrían aumentar significativamente la tasa de biodegradación de hidrocarburos con eficiencias de eliminación > 70 % y que el bioaumento con estiércol de vaca mejoró aún más la eficiencia de eliminación hasta el 82 %.

Pero ello es rechazado por Han Tao et al., (2016), quien indica en su estudio que la enmienda de biochar no resultó en una mejora significativa de la eliminación de TPH; por el contrario, mostró un claro impacto negativo sobre el crecimiento del raigrás y la eliminación de TPH por parte del raigrás.

Por otro lado, también se pudo descubrir en la revisión sistemática realizada que comparado el efecto de aplicar biocarbón y carbón activado en suelos contaminados con hidrocarburos la eliminación de TPH era mayor en suelos enmendados con biocarbón y fertilizante en comparación con suelos enmendados con carbón activado y fertilizante.

Siendo ello respaldado por: Jia Jianli et al., (2017, p.1), Brown David et al., (2017), Agarry Samuel et al., (2016), Uyizeye Olivia et al., (2019).

Así mismo, en el estudio de Tazangi M. et al., (2020, p.1) apoya lo anteriormente dicho, señalando que la constante de biodegradación (K) para el carbón activo osciló entre 0,0139 y 0,0328 día⁻¹, mientras que varió entre 0,0145 y 0,0369 día⁻¹ para biocarbón; además, este valor fue de 0,0088 para el suelo de control y la vida media para el suelo de control fue de 78,7 días, que disminuyó como resultado de la aplicación de varios tamaños y pesos de carbón activo (21,13 a 49,8 días) y biocarbón (18,7 a 47,8 días); lo que confirma que el biocarbón fue ligeramente más eficiente que el carbón activado, aunque se observó una mayor eficiencia de eliminación con ambas enmiendas en comparación con el suelo no modificado.

Mostrando oposición a lo señalado anteriormente se encuentra Brown David et al., (2017), quien afirma que, probando la adición de nutrientes, biosurfactante, extracto enzimático de *Eisenia fetida* (lombriz de tierra), agentes de carga y sorción y neutralización del suelo. Se encontró que estos tratamientos lograron eliminar hasta el 53% del total de hidrocarburos de petróleo en el suelo en 16 semanas; pero una estrategia que mostró un mejor rendimiento fue una combinación de nutrientes, biocarbón y biosurfactante, que se descubrió que eliminaba un 23 % más de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) que el fertilizante solo.

Los factores que alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se detallan en la tabla 5, respecto a la tabla 4.

Tabla N°5. Factores que alteran las propiedades del biocarbón

| Factor | Descripción | Comentario | Referencias |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Relacionado con la producción | | | |
| <i>Tipo de materia prima</i> | Madera de pino ponderosa y cáscara de nogal | En comparación con el control de fertilizante, el tratamiento con biocarbón de madera de pino y fertilizante mejoró la eliminación de TPH, mientras que la eliminación de TPH se inhibió en el tratamiento con biocarbón de cáscara de nuez y fertilizante. | Mukome Fungai et al., 2020 |
| | Harina de hueso, madera y harina de pescado | La clasificación de la eficiencia de eliminación de hidrocarburos de petróleo F3 (C ₁₆ –C ₃₄) en suelo congelado fue la siguiente: tratamiento con biocarbón derivado de harina de huesos y fertilizante (73 %) > tratamiento con biocarbón de madera y fertilizante (aproximadamente 42 %) > biocarbón de harina de pescado y fertilizante (aproximadamente 4,7%). | Karpinen Erin et al., 2017 |
| | Lodos de depuradora y vegetales (frutas) | La eficiencia de eliminación fue mayor en el biocarbón de lodos de depuradora (75,63 %) que en el biocarbón vegetal (fruta) (72,27 %). | Aziz Sadia et al., 2020 |
| <i>Temperatura</i> | 300 y 600 °C | La temperatura de pirólisis influyó en el efecto de la tasa de aplicación de biocarbón. El aumento de la tasa de aplicación de biocarbón del 1 al 2% dio como resultado residuos de PAH más bajos y más altos en el suelo tratado con biocarbón a temperaturas más bajas y más altas, respectivamente. | Song Yang et al., 2017 |
| <i>Tipo de materia prima y temperatura de pirólisis</i> | Paja de trigo y aserrín; 300 y 500 °C | La eliminación de PAH fue mayor en biocarbón producido a 500 °C que a 300 °C. Por el contrario, el tipo de materia prima tuvo un | Kong Lulu et al., 2018 |

| | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| | | pequeño efecto sobre la degradación de PAH | |
| | Cáscaras de nuez, mazorcas de maíz, tallos de maíz y paja de arroz; 250, 400 y 600 °C | El mapa de calor con análisis de agrupamiento de biodegradación mostró que la temperatura de pirólisis y la materia prima influyeron en la eliminación de PAH | Zhang Guixiang et al., 2020 |
| <i>Tamaño de partícula</i> | 480, 70 y 20 micras | La eliminación de TPH aumentó con la disminución del tamaño de las partículas | Agarry Samuel et al., 2016 |
| Relacionado con la aplicación | | | |
| <i>Rango de aplicación</i> | 5 y 10% | La eliminación de TPH disminuyó con el aumento de la tasa de aplicación | Mukome Fungai et al., 2020 |
| | 20, 30 y 40 g | La eliminación de TPH aumentó con la tasa de aplicación | Agarry Samuel et al., 2016 |
| <i>Método de aplicación</i> | Incorporación e inyección | Una disminución significativa en los hidrocarburos de petróleo F2 (C ₁₀ -C ₁₆) y F3 (C ₁₆ -C ₃₄) ocurrió solo en el día 334 con la inyección, mientras que la incorporación provocó una rápida disminución dentro de los 31 días. | Karpinen Erin et al., 2017 |
| Relacionado con contaminantes | | | |
| <i>Concentración de hidrocarburo</i> | 16.000 y 21.000 mg/kg | La eliminación de TPH alcanzó el estándar de la EPA de EE. UU. (10 000 mg/kg) después de 230 días en el suelo muy contaminado, mientras que el suelo ligeramente contaminado alcanzó ese umbral en el día 30. | Mukome Fungai et al., 2020 |

Elaboración propia

Los factores que alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo son los relacionados con la producción, relacionados con la aplicación y relacionados con contaminantes; donde los factores relacionados con la producción pueden ser el tipo de materia prima, temperatura de pirólisis, tiempo de residencia y tamaño de partícula) pueden afectar la remediación porque determinan las propiedades del biocarbón.

Las modificaciones del biocarbón pueden cambiar sus propiedades y, por lo tanto, proporcionar mejoras en las aplicaciones del biocarbón; ello es corroborado por Pratap t. et al., (2021, p.501); quien afirma que reducir el tamaño del biocarbón a la escala de nanolongitud para hacer nanobiocarbón da un área de superficie alta, alta porosidad, grupos funcionales de superficie aumentados y sitios activos de superficie; lo que conlleva al aumento de la adsorción de contaminantes.

Así también, Bastidas O. et al., (2018, p.606), apoya lo mencionado donde indica que los factores relacionados con la producción son quienes alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante, afirmando que la influencia de la temperatura de pirólisis (300–800 °C) en la composición y la química de la superficie del biocarbón preparado a partir de desechos genera resultados mejorados en el C fijo, las cenizas y los cationes básicos del biocarbón, mientras que su humedad, volátiles y composición elemental (O, H, N y S) disminuyeron con el aumento de la temperatura de pirólisis.

Los factores relacionados con la aplicación (p. ej., la tasa de aplicación, el tiempo y el método) y los factores relacionados con el contaminante (tipo, cantidad y composición del contaminante del suelo) también juegan un papel importante en la determinación de la respuesta del biocarbón en suelos contaminados.

Así mismo, Song Yang et al., (2017), indica que la temperatura como factor altera las propiedades del biocarbón; ya que, la eliminación de PAH fue mayor en biocarbón producido a 500 °C que a 300 °C. También, Zhang Guixiang et al., (2020) en la tabla 4, señala que el mapa de calor con análisis de agrupamiento de biodegradación mostró que la temperatura de pirólisis y la materia prima influyeron en la eliminación de PAH.

Pero ello es opuesto por lo señalado con Agarry Samuel et al., (2016), quien indica que la eliminación de TPH aumentó con la disminución del tamaño de las partículas. Siendo opuesto a los resultados presentados por Kong Lulu et al., (2018), quien indica que, por el contrario, el tipo de materia prima tuvo un pequeño efecto sobre la degradación de PAH, siendo el factor que altera las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo la temperatura de pirólisis.

Por último, el mecanismo de remediación del bicarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se encuentra se clasificó en la tabla 6.

Tabla N°6. Mecanismo de remediación

| <i>Mecanismo de remediación</i> | <i>Bioestimulación</i> | <i>Provisión de refugio y sirve de sustrato</i> | <i>Kong Lulu et al., 2018, Wang Yanjie et al., 2017, Zhang et al., 2018, Mukome et al., 2020, Bao Huanyu et al., 2020, Li Xiaona et al., 2019</i> |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Mejora de las propiedades del suelo como pH, CEC, WHC, nutrientes | |
| | Sorción | Disminución de la biodisponibilidad de los hidrocarburos | Galitskaya O. et al., 2016, Abbaspour Ali et al., 2020, Agarry Samuel et al., 2016, Zhang Guixiang et al., 2018, Zhang Guixiang et al., 2020 |

La interacción del biocarbón en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos es el mecanismo de remediación que se aplique, donde el mecanismo de remediación del bicarbon como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se clasificaron en bioestimulación y sorción; siendo que la bioestimulación es el mecanismo que presenta mejores resultados, pero no se aplica en mayor cantidad en comparación con la sorción.

Ello debido a que, el mecanismo de remediación mediante bioestimulación permite el aumento de la población microbiana, aumento de la actividad enzimática, cambio en la comunidad microbiana, fomento de los degradadores de hidrocarburos, aumento del gen degradador específico/gen funcional.

Los resultados de Kong Lulu et al., (2018), se destacaron el potencial de la aplicación de biocarbón y la bioestimulación para acelerar la biodegradación de los PAH, lo que podría atribuirse a las propiedades de los biocarbón que se benefician de hacer del suelo enmendado un mejor hábitat para los microbios.

Por su parte Wang Yanjie et al., (2017), también afirma que las características del suelo contaminado (capacidad de retención de agua y nutrientes) mejora significativamente mediante la adición de biochar ($p < 0,05$), ya que, el conteo microbiano total aumentó significativamente en el tratamiento que contenía biocarbón y nutrientes agregados ($t = 23,429$, $p = 0,002$); pudiendo concluir en su estudio que el suelo contaminado con petróleo se puede remediar de manera eficiente mediante la bioestimulación, con la adición simultánea de biocarbón y nutrientes, y esta combinación de remediación fue superior a la observada con la adición de polvo de paja de junco.

Por su parte Aziz Sadia et al., (2020, p.1), afirma que la adición de bioestimulación permite la eliminación mejorada de hidrocarburos de petróleo totales. Siendo ello corroborado por Zhang Guixiang et al., (2020, p.1), quien mediante el análisis de componentes principales (PCA) indicó que los minerales inorgánicos en biocarbón jugaron un papel clave en estimular la abundancia microbiana (bacterias) y la diversidad (bacterias y hongos) en el suelo de la planta de coque, y correlaciones significativamente negativas entre las concentraciones residuales de PAH en biocarbón suelos tratados y el contenido de cenizas en biocarbón (generalmente, $p < 0,05$ para PAH con 3–6 anillos); pudiendo con estos hallazgos sugerir un efecto positivo de los minerales inorgánicos de biocarbón en la estimulación de cambios en los microorganismos, lo que podría contribuir a la biodegradación de los PAH en el suelo de la planta de coque.

V. CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados se puede concluir que:

- a. La comparación de la eficiencia de la enmienda del bicarbón agregada al suelo como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo es mayor cuando se emplea la adición del biocarbón, siendo ello corroborado por el 80% de los investigadores; también se pudo descubrir que comparado el efecto de aplicar biocarbón y carbón activado en suelos contaminados con hidrocarburos la eliminación de TPH era mayor en suelos enmendados con biocarbón y fertilizante en comparación con suelos enmendados con carbón activado y fertilizante.
- b. Los factores que alteran las propiedades del biocarbón como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo son los relacionados con la producción, relacionados con la aplicación y relacionados con contaminantes; donde los factores relacionados con la producción pueden ser el tipo de materia prima, temperatura de pirólisis, tiempo de residencia y tamaño de partícula) pueden afectar la remediación porque determinan las propiedades del biocarbón.
- c. El mecanismo de remediación del bicarbono como agente estimulante para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo depende de la interacción del biocarbón en la remediación de suelos contaminados; donde el mecanismo de remediación del bicarbono como agente estimulante se clasificaron en bioestimulación y sorción; siendo que la bioestimulación es el mecanismo que presenta mejores resultados, pero no se aplica en mayor cantidad en comparación con la sorción. Ello debido a que, el mecanismo de remediación mediante bioestimulación permite el aumento de la población microbiana, aumento de la actividad enzimática, cambio en la comunidad microbiana, fomento de los degradadores de hidrocarburos, aumento del gen degradador específico/gen funcional.

VI. RECOMENDACIONES

Con los estudios realizados y pudiendo ahondar en la problemática de los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo se puede recomendar los siguientes puntos:

- a. Es necesario realizar estudios futuros para identificar los factores que determinan el mecanismo de la función del biocarbón en el suelo contaminado, de modo que la aplicación del biocarbón pueda dirigirse hacia la bioestimulación en lugar de la sorción; ya que, se ha quedado comprobado que los estudios que aplican la bioestimulación presentan mejores resultados.
- b. Se recomienda realizar estudios enfocados en las variaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo empleando el biocarbón; así como su variación cuando se aplica biocarbón y carbón activado y esto es debido a que la mejora en las propiedades fisicoquímicas son la primera vía por la cual el biocarbón va a mejorar la degradación de cualquier tipo de contaminante.
- c. Se recomienda realizar estudios a nivel de campo, ya que, entre las literaturas estudiadas se puede observar que en su mayoría se encuentran aplicadas a laboratorio, invernadero u otros, pero estudios realizados en campo con las condiciones y sus variaciones naturales son pocas, pero son necesarias para ver como actúa la aplicación del biocarbón y cuáles son sus influencias en el suelo.

REFERENCIAS

1. ABBASPOUR, Ali, et al. Remediation of an oil-contaminated soil by two native plants treated with biochar and mycorrhizae. *Journal of environmental management*, 2020, vol. 254, p. 109755. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109755>
2. ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSOUR, Mona SM. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian journal of petroleum*, 2016, vol. 25, no 1, p. 107-123. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
3. ABESSA, Denis MS, et al. Pollution status of marine protected areas worldwide and the consequent toxic effects are unknown. *Environmental pollution*, 2018, vol. 243, p. 1450-1459. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.129>
4. AGARRY, Samuel Enahoro; OGHENEJOBOR, Kigho Moses; SOLOMON, Bamidele Ogbe. Kinetic modelling and half life study of adsorptive bioremediation of soil artificially contaminated with bonny light crude oil. *Journal of Ecological Engineering*, 2016, vol. 16, no 3, p. 1--13. Disponible en: <https://doi.org/10.12911/22998993/2799>
5. AGUIRRE-RUBÍ, Javier R., et al. Prospective biomonitor and sentinel bivalve species for pollution monitoring and ecosystem health disturbance assessment in mangrove-lined Nicaraguan coasts. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 649, p. 186-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.269>
6. AL-HARBI, Meshari, et al. Human health risks from brominated flame retardants and polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor dust. *Chemosphere*, 2021, p. 131005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131005>

7. ALFARO, Aristides; DENYER, Percy. Petroleum in the Caribbean of Costa Rica: history, exploratory activities and political intrigues. 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.46699>
8. ANCIONE, Giuseppa; LISI, Roberto; MILAZZO, Maria Francesca. Human health risk associated with emissions of volatile organic compounds due to the ship-loading of hydrocarbons in refineries. Atmospheric Pollution Research, 2021, vol. 12, no 2, p. 432-442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.12.004>
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. AWAD, Yasser M., et al. Biochar effects on rice paddy: meta-analysis. Advances in agronomy, 2018, vol. 148, p. 1-32. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.005>
11. AZIZ, Sadia, et al. Enhanced bioremediation of diesel range hydrocarbons in soil using biochar made from organic wastes. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, vol. 192, no 9, p. 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08540-7>
12. BALCIOĞLU, Esra Billur. Potential effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in marine foods on human health: a critical review. Toxin Reviews, 2016, vol. 35, no 3-4, p. 98-105. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15569543.2016.1201513>
13. BAO, Huanyu, et al. Effects of biochar and organic substrates on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structure in PAHs-contaminated soils. Journal of hazardous materials, 2020, vol. 385, p. 121595. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121595>
14. BARATI, Maryam, et al. Total petroleum hydrocarbon degradation in contaminated soil as affected by plants growth and biochar. Environmental

- Earth Sciences, 2017, vol. 76, no 20, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7017-7>
15. BANSAL, Vasudha; KIM, Ki-Hyun. Review of PAH contamination in food products and their health hazards. *Environment international*, 2015, vol. 84, p. 26-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.06.016>
16. Bastidas-Oyanedel, J.-R., & Schmidt, J. E. (2018). Waste Biorefinery in Arid/Semiarid Regions. *Waste Biorefinery*, 605–621. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63992-9.00020-3>
17. BORJI, Hadil, et al. Nanotechnology to remove polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons from water: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, vol. 18, no 3, p. 729-746. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00979-x>
18. British Petroleum, 2020. Revisión estadística de BP de la energía mundial 2020. 69 ed. Londres, Reino Unido. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-oil>
19. BROWN, David M., et al. Comparison of landfarming amendments to improve bioremediation of petroleum hydrocarbons in Niger Delta soils. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 596, p. 284-292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.072>
20. CERNIGLIA, Carl E. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Current opinion in biotechnology*, 1993, vol. 4, no 3, p. 331-338. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.08.023>
21. DE SANTANA CAMPELO, Renata Polyana, et al. Oil spills: The invisible impact on the base of tropical marine food webs. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 167, p. 112281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112281>

22. Deem, L. M., & Crow, S. E. (2017). Biochar. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10524-x>
23. DIKE, Charles Chinyere, et al. Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils?. Environment International, 2021, vol. 154, p. 106553. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553>
24. EMBRANDIRI, Asha, et al. Environmental xenobiotics and its effects on natural ecosystem. En Plant responses to xenobiotics. Springer, Singapore, 2016. p. 1-18. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2860-1_1.
25. FERNANDES, Leao J., et al. Robust optimization for petroleum supply chain collaborative design and planning. En Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, 2016. p. 1569-1574. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50266-6>
26. GALITSKAYA, Polina; AKHMETZYANOVA, Leisan; SELIVANOVSKAYA, Svetlana. Biochar-carrying hydrocarbon decomposers promote degradation during the early stage of bioremediation. Biogeosciences, 2016, vol. 13, no 20, p. 5739-5752. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/bg-13-5739-2016>
27. GAO, Huan, et al. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. Environmental Pollution, 2021, p. 118511. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511>
28. GIELNIK, Anna, et al. Effect of digestate application on microbial respiration and bacterial communities' diversity during bioremediation of weathered petroleum hydrocarbons contaminated soils. Science of the total environment, 2019, vol. 670, p. 271-281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.176>
29. GITIPOUR, Saeid, et al. Treatment technologies for PAH-contaminated sites: a critical review. Environmental monitoring and assessment, 2018, vol. 190, no 9, p. 1-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6936-4>

30. GOSAI, Haren B., et al. Concentrations, input prediction and probabilistic biological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along Gujarat coastline. *Environmental geochemistry and health*, 2018, vol. 40, no 2, p. 653-665. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0011-x>
31. HAN, Tao, et al. Combination of biochar amendment and phytoremediation for hydrocarbon removal in petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 21, p. 21219-21228. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7236-6>
32. HIREMATH, Pavan; SHETTAR, Manjunath; GOWRISHANKAR, M. C. Investigation on mechanical and physical properties of GFRP-Egg shell powder hybrid composites. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, no 32, p. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i32/97024>
33. JIA, Jianli, et al. The dynamic change of microbial communities in crude oil-contaminated soils from oil fields in China. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2017, vol. 26, no 2, p. 171-183. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2017.1264923>
34. JIA, Jinpu, et al. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: Sources, exposure, and cancer risk. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 241, p. 750-758. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.002>
35. KADRI, Tayssir, et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by fungal enzymes: A review. *Journal of environmental sciences*, 2017, vol. 51, p. 52-74. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.08.023>
36. KANG, Fuxing, et al. Sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons during haze days in eastern China: A 1-year case study in Nanjing City. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 140, p. 76-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.022>

37. KARPPIINEN, Erin M.; SICILIANO, Steven D.; STEWART, Katherine J. Application method and biochar type affect petroleum hydrocarbon degradation in northern landfarms. *Journal of environmental quality*, 2017, vol. 46, no 4, p. 751-759. Disponible en: <https://doi.org/10.2134/jeq2017.01.0038>
38. KOŁTOWSKI, Michał, et al. Effect of steam activated biochar application to industrially contaminated soils on bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and ecotoxicity of soils. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 566, p. 1023-1031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.114>
39. KONG, Lulu, et al. Biochar accelerates PAHs biodegradation in petroleum-polluted soil by biostimulation strategy. *Journal of hazardous materials*, 2018, vol. 343, p. 276-284. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.040>
40. KUMAR, Abhay, et al. Biochar aging in contaminated soil promotes Zn immobilization due to changes in biochar surface structural and chemical properties. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 626, p. 953-961. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.157>
41. 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>
42. KHORRAM, Mahdi Safaei, et al. Biochar: a review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of environmental sciences*, 2016, vol. 44, p. 269-279. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
43. LANG, Firmin Semboung, et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangrove sediments under different strategies: natural attenuation, biostimulation, and bioaugmentation with *Rhodococcus erythropolis* T902. 1. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, vol. 227, no 9, p. 1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2999-4>

44. LI, Xiaona, et al. Combined effects of maize straw biochar and oxalic acid on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structures in soil: a mechanistic study. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 364, p. 325-331. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.041>
45. LUO, Shasha, et al. Long-term biochar application influences soil microbial community and its potential roles in semiarid farmland. *Applied Soil Ecology*, 2017, vol. 117, p. 10-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.024>
46. MANISALIDIS, Ioannis, et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 2020, vol. 8, p. 14. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
47. MUKOME, Fungai ND, et al. Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265, p. 115006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>
48. NIU, Xinyi, et al. Atmospheric levels and cytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and oxygenated-PAHs in PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environmental pollution*, 2017, vol. 231, p. 1075-1084. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.099>
49. NUNES, Beatriz Zachello, et al. Marine protected areas in Latin America and Caribbean threatened by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 269, p. 116194. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116194>
50. OBIA, Alfred, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, vol. 155, p. 35-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.002>
51. OLADI, Mahshid; SHOKRI, Mohammad Reza. Multiple benthic indicators are efficient for health assessment of coral reefs subjected to petroleum hydrocarbons contamination: A case study in the Persian Gulf. *Journal of*

Hazardous Materials, 2021, vol. 409, p. 124993. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124993>

52. PRAKASH, Bansal Om. Persistent organic compounds in the environment their impact on human health: a review. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences, 2019, vol. 8, no 2, p. -. Disponible en: <https://doi.org/10.30574/gscbps.2019.8.2.0145>

53. PRATAP, Tej, et al. Nanobiochar: A sustainable solution for agricultural and environmental applications. En Nanomaterials for Soil Remediation. Elsevier, 2021. p. 501-519. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822891-3.00028-1>

54. QU, Yajing, et al. Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China. Environmental Pollution, 2020, vol. 260, p. 114016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114016>

55. RACHWAŁ, Marzena; MAGIERA, Tadeusz; WAWER, Małgorzata. Coke industry and steel metallurgy as the source of soil contamination by technogenic magnetic particles, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. Chemosphere, 2016, vol. 138, p. 863-873. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.077>

56. SANCHO, Andre, et al. Cluster Analysis of Crude Oils based on Physicochemical Properties. En Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, 2020. p. 541-546. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50091-4>

57. SONG, Yang, et al. Dynamic effects of biochar on the bacterial community structure in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. Journal of agricultural and food chemistry, 2017, vol. 65, no 32, p. 6789-6796. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02887>

58. Speight, J. G. (2018). Fuels: Oil-Based. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14561-5>
59. STOGIANNIDIS, Efstathios; LAANE, Remi. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: an overview of possibilities. Reviews of environmental contamination and toxicology, 2015, p. 49-133. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0_2
60. SUN, Kailun, et al. A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics. Science of The Total Environment, 2021, p. 145403. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403>
61. TAZANGI, Mina Hashemi, et al. Monitoreo Cinético de Biorremediadores para Biodegradación de Suelos Contaminados con Gasóleo. Contaminación del agua, el aire y el suelo , 2020, vol. 231, nº 8, pág. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04794-6>
62. TIJANI, Jimoh O., et al. Pharmaceuticals, endocrine disruptors, personal care products, nanomaterials and perfluorinated pollutants: a review. Environmental chemistry letters, 2016, vol. 14, no 1, p. 27-49. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0537->
63. TURAKI USMAN, Aliyu; ABUGU, Hillary Onyeka; OKOYE, Chukwuma Obiajulu Benedict. Environmental impact and human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs) in raw milk from free-ranging cattles in northwest nigeria. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2021, p. 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00708-8>
64. UYIZEYE, Olivia Chitayat; THIET, Rachel K.; KNORR, Melissa A. Effects of community-accessible biochar and compost on diesel-contaminated soil. Bioremediation Journal, 2019, vol. 23, no 2, p. 107-117. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10889868.2019.1603139>

65. VARJANI, Sunita J., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons from petroleum oil industry activities: effect on human health and their biodegradation. *En Waste bioremediation*. Springer, Singapore, 2018. p. 185-199. Disponible en: [https://doi.org/ 10.1007/978-981-10-7413-4_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_9)
66. WANG, Li, et al. Halogenated and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables: levels, dietary intakes, and health risk assessments. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 616, p. 288-295. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.336>
67. WANG, Mingming, et al. Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, vol. 63, p. 156-173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.004>
68. WANG, Mengjing, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor environments are still imposing carcinogenic risk. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 409, p. 124531. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124531>
69. WANG, Jian, et al. Contamination and health risk assessment of PAHs in soils and crops in industrial areas of the Yangtze River Delta region, China. *Chemosphere*, 2017, vol. 168, p. 976-987. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.113>
70. WANG, Yanjie, et al. Remediation of petroleum-contaminated soil using bulrush straw powder, biochar and nutrients. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2017, vol. 98, no 5, p. 690-697. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2064-z>
71. YANG, Lu, et al. Yearly variation in characteristics and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-PAHs in urban shanghai from 2010–2018. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, vol. 99, p. 72-79. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.017>

72. YUAN, Peng, et al. Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 659, p. 473-490. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.400>
73. ZAMA, Eric F., et al. Advances in research on the use of biochar in soil for remediation: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, no 7, p. 2433-2450. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2000-9>
74. ZHANG, Bofan; ZHANG, Liang; ZHANG, Xiuxia. Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *RSC advances*, 2019, vol. 9, no 60, p. 35304-35311. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C9RA06726D>
75. ZHANG, Guixiang, et al. Effect of biochar on the presence of nutrients and ryegrass growth in the soil from an abandoned indigenous coking site: the potential role of biochar in the revegetation of contaminated site. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 601, p. 469-477. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.218>
76. ZHANG, Guixiang, et al. The effects of different biochars on microbial quantity, microbial community shift, enzyme activity, and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil. *Geoderma*, 2018, vol. 328, p. 100-108. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.009>
77. ZHANG, Guixiang, et al. Mechanism of biochar as a biostimulation strategy to remove polycyclic aromatic hydrocarbons from heavily contaminated soil in a coking plant. *Geoderma*, 2020, vol. 375, p. 114497. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114497>
78. ZHANG, Xiao, et al. Using deterministic and probabilistic approaches to assess the human health risk assessment of 7 polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Cleaner Production*, 2021, p. 129811. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129811>

ANEXOS

ANEXOS N° 1

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO |
| DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S) | |
| PAGINAS UTILIZADAS | Año de publicación |
| | Lugar de publicación |
| TIPO DE INVESTIGACION: | |
| CÓDIGO: | |
| PALABRAS CLAVES: | Study, bicarbon, stimulating, agent, bioremediation, soils, contaminated, petroleum, hydrocarbons |
| EFICIENCIA DE LA ENMIENDA DEL BICARBON | |
| FACTORES QUE ALTERAN LAS PROPIEDADES DEL BICARBON | |
| MECANISMO DE REMEDIACION DEL BICARBON | |
| RESULTADOS: | |
| CONCLUSIONES: | |

Elaboración propia