

Aplicación de biocarbón como estrategia de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Adding biochar as a strategy for clean-up of hydrocarbon-contaminated soils

Angie Tatiana Ortega-Ramírez ^{a,b}, María Paula Olaya Pulido ^a

RESUMEN

La contaminación de suelos con hidrocarburos es una problemática persistente a nivel mundial. A pesar de que se han estudiado diferentes métodos de descontaminación, su aceptación ha sido limitada por amplios desafíos a nivel técnico, económico y ambiental, por lo que se reconoce la importancia de abarcar mecanismos mayormente viables y sostenibles, como la remediación a partir de la aplicación de biocarbón. Para tal fin, se realizó un análisis documental de información secundaria acerca de las propiedades y el uso del biocarbón como una alternativa viable para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, que permitió identificar como resultado que este compuesto presenta un alto potencial por sus excelentes características fisicoquímicas. Estas cualidades le permiten al biocarbón desempeñarse como un agente sorbente, de bioestimulación de las actividades enzimáticas de la microbiota edáfica autóctona, que degrada los contaminantes a través de diferentes rutas metabólicas, además de participar en la bioaugmentación de microorganismos hidrocarbonoclasticos, lo que resulta en altas eficiencias de bioremediación.

PALABRAS CLAVE: biocarbón, hidrocarburos, remediación, suelo.

ABSTRACT

Hydrocarbon-contaminated soils are a persistent problem worldwide. Although different removal methods have been addressed, extensive technical, economic, and environmental challenges have limited their acceptance. Therefore, the importance of adopting broadly viable and sustainable solutions, such as remediation from biochar application, is recognized. For this purpose, this study developed a documentary analysis of secondary information on the properties and use of biochar as a more sustainable alternative for the restoration of soils contaminated with hydrocarbons, obtaining that it has a high potential due to its outstanding physicochemical characteristics that allow it to work as a sorbent agent, biostimulating the enzymatic activities of the native edaphic microbiota that degrades contaminants through different metabolic pathways, in addition to participating in the bioaugmentation of hydrocarbonoclastic microorganisms, resulting in high bioremediation efficiencies.

KEYWORDS: remediation, biochar, hydrocarbons, soil.

a Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. Grupo de Gestión Ambiente y Sostenibilidad. ORCID Ortega-Ramírez, A.: <https://orcid.org/0000-0002-6364-8432>; ORCID Olaya-Pulido, M. P.: <https://orcid.org/0000-0003-2953-4914>

b Autor de correspondencia: angie.ortega@profesores.uamerica.edu.co

Recepción: 30 de octubre de 2022. Aceptación: 01 de febrero de 2023.

Introducción

El constante uso de los hidrocarburos para la producción de energía y materias primas a nivel mundial ha estado acompañado por una serie de eventos desastrosos, como los derrames accidentales que derivan en la contaminación del suelo. Estos generan como consecuencia impactos ambientales y riesgos significativos tanto a nivel ecológico como para la salud humana, por su baja degradabilidad y alta toxicidad (Ambaye et al., 2022; Dike et al., 2021; Ossai et al., 2020; Xu & Lu, 2010).

La contaminación de suelos con hidrocarburos puede generarse como resultado de la exploración y producción de petróleo y gas; transporte y almacenamiento; fugas de tanques; derrames accidentales en la carga y descarga; lastrado y deslastrado; abastecimiento de combustible; incidentes petroleros; efluentes y vertimientos de la industria petroquímica; emisiones fugitivas; rotura de gasoductos subterráneos por situaciones de emergencia de orden público, y por desastres naturales (Ossai et al., 2020).

En particular, los hidrocarburos se componen de carbono, hidrógeno, oxígeno y en algunas ocasiones de nitrógeno y azufre. Estos se denotan como simples y complejos, a la vez que pueden clasificarse en: saturados (como el metano CH_4 y el ciclo butano C_4H_8); resinas (como las piridinas $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ y las quinolinas $\text{C}_9\text{H}_7\text{N}$); aromáticos (que se dividen en monoaromáticos —dentro de los que destacan el benceno C_6H_6 , tolueno C_7H_8 , etilbenceno C_8H_{10} y xileno C_8H_{10} — y en poliaromáticos —como el naftaleno C_{10}H_8 —), y asfaltenos (como el ácido palmítico $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$ y los fenoles $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) (Dike et al., 2021; Ossai et al., 2020). Del mismo modo, los hidrocarburos de cadena lineal, con anillos, coloidales y asfaltenos, constituyen los hidrocarburos totales de petróleo o TPH. Por otro lado, se distinguen los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los cuales generalmente se clasifican según la cantidad de anillos de benceno en las categorías de bajo peso molecular (2-3-4 anillos) y en compuestos de alto peso molecular (5-6 anillos) (Li, G. et al., 2020). En conjunto, la totalidad de hidrocarburos son difícilmente degradados por parte de la microflora autóctona del suelo contaminado (Zhang, B. et al., 2019).

A nivel del suelo, los hidrocarburos afectan sus propiedades físicas, como la textura, la compactación,

el estado estructural, la resistencia a la penetración, la conductividad hidráulica saturada; así como las propiedades químicas dentro de las que destacan la densidad de coloides, el fenómeno de doble capa difusa o los complejos de esfera interna o externa que se presenten (Ossai et al., 2020).

De los compuestos anteriormente mencionados, la mayoría se clasifican como contaminantes ambientales y debido a sus propiedades cuentan con la capacidad de biocumulación, lo que genera gran variedad de efectos toxicológicos en seres humanos y animales, tales como hemotoxicidad, carcinogenicidad, genotoxicidad, citotoxicidad, neurotoxicidad e inmunotoxicidad (Dike et al., 2021; Zhou et al., 2022). Dentro de dichos compuestos destacan los contaminantes orgánicos persistentes (COP) y los HAP (el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno, BTEX) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2020).

En los últimos años, los estudios relacionados con la mitigación de los impactos ambientales por derrames de hidrocarburos han presentado una amplia variedad de opciones de remediación de suelos contaminados con estas sustancias, las cuales involucran varios procedimientos *in situ* y *ex situ*. Estas comprenden contención, separación y destrucción bajo métodos de tratamiento biológicos, químicos, fisicoquímicos, térmicos, eléctricos, electromagnéticos, acústicos y ultrasónicos, entre los que son más utilizados la incineración, solidificación/estabilización, extracción de vapor del suelo, lavado del suelo o extracción con solventes, remediación electrocinética, oxidación fotocatalítica, tratamiento térmico y oxidación química (Oleszczuk et al., 2019; Ossai et al., 2020). No obstante, su aceptación ha sido limitada porque presentan grandes desafíos como producto de las restricciones técnicas, económicas y ambientales por su alto consumo de energía, elevados costos de implementación y su amplio potencial de generar impactos ambientales negativos adicionales como residuos peligrosos y emisiones atmosféricas, por lo que este tipo de contaminación continúa persistiendo a nivel mundial (Meyer et al., 2014; Saeed et al., 2021; Xu & Lu, 2010).

En consecuencia, se evidencia la imperante necesidad de estudiar métodos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos cuyo enfoque

incluya el ser económicamente viables y sostenibles, como la biorremediación con biocarbón (El-Naggar et al., 2019; Qiao et al., 2018; Wu, Y. et al., 2022). Por lo anterior, el presente artículo aborda una revisión bibliográfica para la identificación del potencial del empleo del biocarbón como alternativa de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Para tal fin, se realiza la descripción de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón y el análisis de la situación actual del uso del biocarbón en este tipo de biorremediación.

Metodología

Se empleó un método de análisis documental de información secundaria, a partir de la búsqueda bibliográfica de textos indexados en diferentes bases de datos, dentro de las que destacan Google Académico, Springer Link, Scopus y Science Direct, que presentan información acerca de las propiedades y el uso del biocarbón como alternativa para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, así como el aporte de evidencia de su aplicabilidad a través de casos de estudio. En total se seleccionaron cincuenta artículos en inglés y en su mayoría (98%) publicados en los últimos cinco años (2017-2022).

Los artículos consultados fueron tomados de revistas como *Chemosphere* (Oxford), *The Science of the Total Environment*, *Journal of Hazardous Materials*, *Journal of Cleaner Production* y *Geoderma*, entre otras.

Las palabras clave empleadas como criterio de búsqueda correspondieron a *biochar*, *biorremediación*, *hydrocarbon contaminated soil*, *crude oil*, *biostimulation*, *bioaugmentation* y *adsorption*.

Resultados y discusión

Biocarbón

El biocarbón es un material carbonoso oscuro y poroso, sintetizado a partir de técnicas de combustión térmica o conversión termoquímica, dentro de las que destacan la carbonización hidrotermal, la carbonización por microondas, la carbonización instantánea, el craqueo por láser y plasma, la gasificación, la torrefacción y la pirólisis (Wang & Wang, 2019; Yaashikaa et al., 2020).

Para garantizar el óptimo rendimiento del biocarbón, su producción se debe realizar mediante la técnica más adecuada según el tipo de biomasa y las condiciones del proceso, como la velocidad del calentamiento, la temperatura y el tiempo de residencia, principalmente. Estas pueden afectar los estados físicos y químicos del biocarbón en la fase de producción, en la que la pirólisis es la técnica más empleada (Wang & Wang, 2019; Yaashikaa et al., 2020).

En la pirólisis se produce el calentamiento de la biomasa (materia orgánica que puede incluir residuos) a un rango de temperatura de 250 °C a 850 °C en ausencia de oxígeno o en presencia de una cantidad limitada de este. La eficiencia en el proceso de pirólisis dependerá de la calidad de la biomasa a emplear, así mismo, esta depende de varios factores, tales como su estructura, su composición y la concentración de minerales que contenga (Tomczyk et al., 2020; Varma et al., 2018; Yaashikaa et al., 2020; Zahed et al., 2021).

Cabe resaltar que la morfología del biocarbón derivado de la biomasa vegetal varía según las condiciones del proceso tras incluir la pérdida de peso. La pérdida de agua se realiza alrededor de los 100 °C, seguido por la celulosa, la hemicelulosa y la lignina por encima de los 220 °C (Yaashikaa et al., 2020).

El biocarbón obtenido a altas temperaturas de pirólisis (500-1000 °C, a través de un proceso rápido) tiene gran efectividad ya que aumenta la microporosidad, el área superficial y la hidrofobicidad para la sorción de contaminantes orgánicos. Aunque el biocarbón formado a bajas temperaturas de pirólisis (300-700 °C, a través de un proceso lento) es más apropiado para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos por precipitación, interacción electrostática y grupos funcionales que contienen oxígeno (Ahmad et al., 2014).

Por sus excelentes características fisicoquímicas como superficie específica, alta porosidad, presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno, pH alcalino (7,3-10,9), capacidad de adsorción y capacidad de intercambio catiónico (CIC), el biocarbón es útil en diversas aplicaciones. Por ejemplo, la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos (Dike et al., 2021; Vijayaraghavan, 2019; Zahed et al., 2021; Zama et al., 2018), ya que su superficie

carbonosa estimula la inmovilización de componentes hidrofóbicos (Abbas et al., 2018).

Varios tipos de biomasa pueden servir como materiales de origen de biocarbón, por ejemplo, estiércol animal, astillas de madera, residuos de cultivos —como bagazo de caña de azúcar, cáscara de nuez, paja de arroz, paja de trigo—, residuos de cebada, de sorgo, rastrojo de maíz, algas verdes, pastos, entre otros (Bianco et al., 2021). Además, debido al rápido crecimiento de la urbanización y el actual estilo de vida, se ha aumentado la generación de residuos de biomasa (agrícolas, forestales y de alimentos), los cuales son potencialmente empleables para la producción de biocarbón, lo que contribuye a hacer una gestión sostenible de estos (Zahed et al., 2021), de manera que participa dentro de la bioeconomía circular (Yaashikaa et al., 2020).

Particularmente, en comparación con los desechos agrícolas, se observa que el biocarbón tiene ventajas dado que presenta mayor contenido de carbono, mayor capacidad de adsorción, óptima capacidad de inmovilización de bacterias y nutrientes, así como mayor estabilidad (Zhang, B. et al., 2019).

Cabe resaltar que el biocarbón producido a través de residuos de cultivos y biomasa leñosa, cuya composición se ve representada por lignina, celulosa y hemicelulosa es más adecuado para la remediación de contaminación orgánica y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el biocarbón con alto contenido de cenizas (estiércol, lodos y similares) se considera apropiado para tratamientos en los que se requiera la remoción de contaminantes orgánicos catiónicos y metales pesados (Ji et al., 2022).

Además de lo anterior, el biocarbón se reconoce como un agente bioestimulador que mejora las condiciones para las actividades bacterianas de los microorganismos existentes o autóctonos y ayuda a tolerar condiciones desfavorables. Esto se da debido a que el biocarbón tiene la propiedad de transportar oxígeno, retener agua y mejorar las actividades enzimáticas, además de proveer nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo o carbono orgánico (Assil et al., 2021; Saeed et al., 2021). Dentro de la bioestimulación de las actividades de enzimáticas destaca la deshidrogenasa, la polifenol oxidasa y la hidrolasa de diacetato de fluoresceína (FDA) (Guo, J. et al., 2021; Zhang, B. et al., 2019).

Además de ser reconocido como un material bioestimulante, el biocarbón tiene el potencial de portar microorganismos hidrocarbonoclasticos que pueden bioaumentar las comunidades microbianas endógenas. En particular, algunos de los géneros con mayor potencial hidrocarbonoclastico son *Rhodococcus*, *Aquabacterium* y *Cavicella* (Assil et al., 2021).

A su vez, el biocarbón se reconoce como un material que acondiciona el suelo y reduce su estrés por contaminación al favorecer el intercambio gaseoso, el crecimiento de las plantas y la biomasa por el aumento de la disponibilidad de agua y nutrientes, la absorción de minerales y regulación de la conducta estomática, gracias a sus propiedades bioestimulantes descritas anteriormente. Además, el biocarbón favorece las enzimas depuradoras de las especies reactivas de oxígeno (ROS) en las plantas, al proporcionar un mecanismo de transferencia de electrones eficiente para disminuir sus efectos tóxicos en estas (Mansoor et al., 2021). Finalmente, cabe mencionar que el biocarbón se considera un producto de alta eficiencia, bajo costo y generador de subproductos inocuos (principalmente CO₂ y H₂O) (Zhang, B. et al., 2019).

Biocarbón como método de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Existen amplias investigaciones sobre la viabilidad del uso de biocarbón como alternativa para la remediación y rehabilitación de suelos contaminados con hidrocarburos, con énfasis en la posibilidad de que funcione como un agente de bioestimulación o como adsorbente (Dike et al., 2021).

En primera instancia, debido a que dicho material impacta la microbiota edáfica autóctona, lo que resulta en la promoción de la degradación de los hidrocarburos en el suelo (Dike et al., 2021), y en consecuencia actuar como adsorbente inmovilizando los contaminantes del suelo al reducir su transporte químico (lixiviación) y su biodisponibilidad (Liu et al., 2018; Ossai et al., 2020).

Además de esto, resalta la técnica de los microorganismos inmovilizados en condiciones favorables de disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes, en la que el biocarbón es uno de los sustratos más económicos, inocuos y eficientes. Esto le ha permitido contar con gran credibilidad en los últimos tiempos

debido a su amplia disponibilidad de materia prima que puede obtenerse del reciclaje de biomasa agrícola residual, alta eficiencia, favorable desempeño ambiental, gran área de superficie interna y propiedades superficiales fisicoquímicas deseables en relación con los demás (Ossai et al., 2020; Zahed et al., 2021).

En segunda instancia, la acción del biocarbón como adsorbente en la eliminación de los hidrocarburos se encuentra relacionada con la adsorción física, el intercambio iónico, la interacción electrostática, la complejación, la precipitación, el efecto hidrofóbico, el enlace de hidrógeno, el llenado de poros y la partición o coeficiente de reparto (Arae et al., 2021).

Son diversas las vías por las cuales se garantiza la biorremediación con biocarbón, correspondientes a la adsorción, promoción de la captura y almacenamiento de carbono, mejora de la fertilidad del suelo y bioestimulación. Mediante esta última acción se inmovilizan los microorganismos endógenos del suelo por métodos de adsorción, atrapamiento y covalencia (Wu, C. et al., 2022), y se estimula su actividad para la degradación de los contaminantes orgánicos dominados por hidrocarburos como fuentes de carbono para la oxidación y descomposición a través de diferentes rutas metabólicas. Esto se da gracias a la provisión de nutrientes como nitrógeno, fósforo y carbono orgánico, además de la reducción de la toxicidad mineralizándolos mediante reacciones de fijación, inactivación, quelación o redox (Assil et al., 2021; Partovinia & Rasekh, 2018).

Por otra parte, es relevante nombrar otra técnica de remediación en la que se inoculan o se enriquecen los microorganismos hidrocarbonoclasticos endógenos o autóctonos con la adición de microorganismos benéficos exógenos para incrementar la tasa de degradación de los contaminantes. En algunos estudios se ha evidenciado que la implementación de un método combinado de remediación biológica y biocarbón puede brindar excelentes perspectivas para los suelos contaminados con hidrocarburos (Ajona & Vasanthi, 2021; Valizadeh et al., 2022). En esta labor, el biocarbón cumple la función de transportador de dichos microorganismos, a la vez que los protege de los factores ambientales externos, del estrés fisicoquímico, la interferencia mecánica y la competencia biológica (Assil et al., 2021; Partovinia & Rasekh, 2018).

No obstante, se observa que la bioestimulación tiene el potencial de ser altamente efectiva en la degradación de los hidrocarburos, mientras que la bioaumentación puede ser limitada a largo plazo debido al estricto monitoreo y control de los microorganismos involucrados (Woźniak-Karczewska et al., 2019). Además, se puede generar una combinación entre la bioaumentación y la bioestimulación, así como la combinación con otros mecanismos de biorremediación, dentro de los que destacan la rizofiltración (Hussain et al., 2018).

Cabe resaltar que algunas de las variables de mayor importancia en lo que respecta a la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos a partir del uso de biocarbón son: el tipo de biomasa empleada como biocarbón, el tipo de hidrocarburo involucrado, el tiempo de residencia, el área superficial, la eficiencia de remoción de contaminantes, la actividad microbiana y los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo. De manera que, en general, la demostración de su potencial se ha realizado a partir de la evaluación de estas variables (Arae et al., 2021).

Finalmente, se resalta que el biocarbón, como material para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, podría desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático por su potencial en la neutralización o en la captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero como el CO₂, el CH₄ y el N₂O (Matustik et al., 2020).

Casos de éxito en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos a partir de la aplicación de biocarbón

El estudio del potencial uso del biocarbón en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos ha sido abordado desde diversos enfoques, a través de los cuales se ha evidenciado su eficiencia y los diferentes mecanismos de acción involucrados en los niveles físico, químico y microbiológico. Estos análisis destacan sus propiedades como adsorbente, acondicionador, agente bioestimulante y en asociación con bioaumentación; los diferentes casos de éxito objeto de estudio se pueden agrupar en cuatro categorías, expresadas en las Tablas 1-4.

Tabla 1. Casos de estudio de bioestimulación y adsorción con el uso de biocarbón para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth	Saeed, M., Ilyas, N., Jayachandran, K., Gaffar, S., Arshad, M., Sheeraz Ahmad, M., Bibi, F., Jeddi, K., & Hessini, K. (2021). <i>Saudi Journal of Biological Sciences</i> , 28(5) 2667-2676.	Empleando una muestra de suelo de jardín de la Universidad Internacional de Florida, Estados Unidos, con el fin de analizar el impacto de la bioestimulación en muestras de suelo contaminadas con diésel (de 10 % a 15 %) bajo el empleo de biocarbón, sintetizado a partir de pirólisis de pinos australianos a 350 °C y un tiempo de residencia de 24 días.	En general, como resultado, se obtuvo una eficiencia de degradación del 34 %; la diversidad microbiana del suelo mejoró en un 41 %; aumentó la actividad enzimática del diacetato de fluorescina (FDA) en un 38,5 %, y de la deshidrogenasa en un 55,6 % (Saeed et al., 2021).
Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons by immobilizing multiple bacteria on wheat bran biochar and its effect on greenhouse gas emission in saline-alkali soil	Guo, S., Liu, X., & Tang, J. (2022). <i>Chemosphere</i> , 286, 131663.	Se estudió la inmovilización de bacterias hidrocarbonoclasticas de los géneros <i>Pseudomonas</i> , <i>Acinetobacter</i> y <i>Sphingobacterium</i> en biocarbón de salvado de trigo pirolizado a 300, 500 y 700 °C proveniente de un campo petrolero de Tianjin, China y muestras de suelo obtenidas de forma aleatoria y estratificada a profundidades de 0 a 60 cm de un área de derrame de petróleo en el campo petrolífero de Dagang, Tianjin.	Se obtiene que la mayor tasa de eliminación de hidrocarburos totales (TPH) con el biocarbón sintetizado a 500 °C y 4 tipos de bacterias diferentes en un rango de 58,31 % a 36,91 %, lo que resalta la importancia de la participación de <i>Acinetobacter</i> en la eliminación de TPH.
Effects of soil organic matter on biochar application in developing the biodegradation potentials of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	Kong, L., Song, B., Zhang, T., Gao, K., & Liu, J. (2021). <i>Applied Soil Ecology</i> , 167, 104046.	Se investigó la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos con biocarbón en muestras de diferentes tipos de suelos de la ciudad de Shijiazhuang, provincia de Hebei, China; dos agrícolas (del área de Jingxing y Jinzhou), y uno forestal (del área de Luquan), enriquecidos con diésel (100 g en peso seco de suelo con 50 % de diésel en peso). El biocarbón empleado se obtuvo con pirólisis de paja de trigo a 500 °C.	Como resultado, a los 84 días se observó la fuerte capacidad de adsorción y degradación del biocarbón de alrededor del 70 %, el cual favoreció a su vez la abundancia, la distribución y el enriquecimiento selectivo de la comunidad bacteriana, dentro de la que sobresalen cepas Gram negativas como la <i>Acidobacteria</i> , la <i>Actinobacteria</i> y la <i>Verrucomicrobia</i> (Kong et al., 2021).
Remediation of crude oil-contaminated coastal marsh soil: Integrated effect of biochar, rhamnolipid biosurfactant and nitrogen application	Wei, Z., Wang, J. J., Gaston, L. A., Li, J., Fultz, L. M., DeLaune, R. D., & Dodla, S. K. (2020). <i>Journal of Hazardous Materials</i> , 396, 122595.	Se observó el impacto de la aplicación integrada de biocarbón, biosurfactante ramnolípido y nitrógeno en la remediación del suelo costero del humedal de Luisiana, contaminado artificialmente con crudo. El suelo empleado fue de marisma salina (fango de Scatlake; muy fino, esmectítico, no ácido, hipertérmico) de Golden Meadow, Louisiana. El biocarbón utilizado se produjo a partir de residuos de caña de azúcar recolectados de Louisiana State University Sugar Research Station, St. Gabriel, LA, los cuales fueron pirolizados a 550 °C (Wei, Wang, Gaston et al., 2020).	Inicialmente se encontró que la eficiencia promedio de la recuperación de hidrocarburos de la muestra de suelo era del 92,1 %. Como resultado de la aplicación integrada de biocarbón con biosurfactante ramnolípido, biocarbón con nitrógeno y biocarbón con nitrógeno y biosurfactante ramnolípido, se obtuvieron porcentajes de remoción de hidrocarburos del 32,3 %, 73,2 % y 80,9 %, respectivamente. Esto permitió observar que las interacciones sinérgicas o tratamientos combinados presentan mayor eficiencia con respecto a las individuales, lo que aumenta la sorción de compuestos aromáticos (Wei et al., 2020).

Continúa

Continuación Tabla 1. Casos de estudio de bioestimulación y adsorción con el uso de biocarbón para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: Ecotoxicity assessment	Wei, Z., Wang, J. J., Meng, Y., Li, J., Gaston, L. A., Fultz, L. M., & DeLaune, R. D. (2020). <i>Chemosphere</i> (Oxford), 253, 1266-17.	Se observó la ecotoxicidad del biosurfactante ramnolípido (en niveles de 0,1 % a 1,4 %); y del beneficio con la aplicación de biocarbón (suministrado al 1 % p/p), cuando se aplican en ecosistemas de humedales para la remoción de hidrocarburos, específicamente en el suelo del humedal de Luisiana, una zona con amplia actividad en la industria del petróleo.	Como resultado se obtuvo que las plantas de <i>Spartina alterniflora</i> pudieron tolerar niveles de ramnolípidos de hasta 0,8 % aunque el crecimiento de las algas se inhibió con concentraciones superiores al 0,1 %. Además, el biocarbón benefició la promoción de la comunidad bacteriana con el auge de bacterias Gram positivas, actinomicetos. y hongos micorrízicos arbusculares, por lo que se evidencia que la aplicación combinada de ramnolípidos y biocarbón presenta la ecotoxicidad más baja para las plantas y las algas cuando se usa en la remediación con aceite de suelos de humedales contaminados (Wei et al., 2020).
Combined Effects of Plant Cultivation and Sorbing Carbon Amendments on Freely Dissolved PAHs in Contaminated Soil	Oleszczuk, P., Rakowska, M., Bucheli, T. D., Godlewska, P., & Reible, D. D. (2019). <i>Environmental Science & Technology</i> , 53(9).	Los autores demostraron el efecto de la aplicación de biocarbón y carbón activado en suelos contaminados con HAP, a través de un experimento en campo a largo plazo (18 meses). A su vez, el estudio evaluó el impacto positivo de diferentes plantas como el trébol, la hierba y el sauce.	Se estableció que la adición directa de biocarbón al suelo no provocó una reducción inmediata de los HAP, mientras que con el carbón activado se logró una reducción de compuestos de 5 y 6 anillos. No obstante, se percibió un aumento de la eficiencia de remoción tanto del biocarbón, como del carbón activado. Para el caso del biocarbón, en el largo plazo se evidenciaron eficiencias de remoción en proporciones de 18 % a 67 % de HAP de 4 y 6 anillos a los 6 meses y para los de 2 y 3 anillos se produjo una disminución gradual del 60 % al 66 % a los 18 meses (Oleszczuk et al., 2019).
Changes in the pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil treated with biochar from a multiyear field experiment	Rombolà, A. G., Fabbri, D., Baronti, S., Vaccari, F. P., Genesio, L., & Miglietta, F. (2019). <i>Chemosphere</i> (Oxford), 219, 662-670.	Se investigó la influencia de la aplicación de biocarbón en la degradación/lixiviación de un suelo agrícola de tipo franco arcillo-arenoso texturado con 70 % arena, 15 % limo y 15 % arcilla, contaminado con HAP. El experimento de campo se realizó en un viñedo entre 2009 y 2014 en "Marchesi Antinori - La Braccasca Estate", Montepulciano, Toscana, Italia. El biocarbón aplicado fue un carbón vegetal comercial proporcionado por "Romagna Carbone snc" (Italia), obtenido a partir de biomasa de poda de huertos (manzana, vid, pera, melocotón) a través de un proceso de pirólisis lenta con un tiempo de residencia de cerca de 3 horas a 500 °C en un horno de 2,2 m de diámetro y con capacidad para aproximadamente 2 toneladas de materia prima.	La investigación dio como resultado un material con un contenido de C, N, H y O de 71,4 %, 0,7 %, 1,5 %, 5,9 % (peso seco), respectivamente; con un 19,9 % de ceniza y un pH de 9,8 (Rombolà et al., 2019). Como resultado de la aplicación del biocarbón se obtuvo un aumento significativo en el pH, la CIC por biodegradación y el carbono orgánico total del suelo por sorción, mientras que disminuyó la densidad aparente por pérdida física. Se registraron reducciones en las concentraciones de HAP que fueron significativas a través del tiempo y alcanzaron los niveles máximos tras 5 años de tratamiento, especialmente con los de bajo peso molecular (Rombolà et al., 2019).

Continúa

Continuación Tabla 1. Casos de estudio de bioestimulación y adsorción con el uso de biocarbón para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Decrypting the synergistic action of the Fenton process and biochar addition for sustainable remediation of real technogenic soil from PAHs and heavy metals	Mazarji, M., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Barakhov, A., Barbashev, A., Dudnikova, T., Lobzenko, I., & Giannakis, S. (2022). <i>Environmental Pollution</i> (1987), 303, 119096.	Se demostró la viabilidad y la relevancia de combinar biocarbón con el proceso Fenton para optimizar la degradación de HAP y la inmovilización de metales pesados en procesos de remediación de suelos contaminados. La evaluación de los resultados de degradación de los PAH se realizó a través de herramientas estadísticas multivariadas, incluido el análisis de componentes principales (PCA) y los mínimos cuadrados parciales (PLS).	El PCA mostró que el nivel de modificación del biocarbón afectó decisivamente al grado de degradación de los PAH totales, lo que destacó el papel del biocarbón en la catalización de la reacción de Fenton. La electrónica de PAH se correlacionó positivamente con la eficiencia de degradación, cuando el nivel de biocarbón se situó en el 5%. Esto se explica por la capacidad del biocarbón para transferir los electrones a los PAH, lo que mejora la degradación similar a la de Fenton (Mazarji et al., 2022).
Negative role of biochars in the dissipation and vegetable uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an agricultural soil: Cautions for application of biochars to remediate PAHs-contaminated soil	Zhang, F., Zhang, G., & Liao, X. (2021). <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i> , 213, 112075.	Experimentalmente se emplearon muestras de suelo superficial de una tierra de cultivo cercana a una planta de coque en China, en la que se identificaron concentraciones medias de 9064 µg/kg de HAP, mientras que el biocarbón se sintetizó a partir de residuos de mazorcas y de cáscaras de nuez pirolizadas a 250 °C, 400 °C y 600 °C durante 4 horas. Por otra parte, se seleccionó la col china (<i>Brassica chinensis</i> L) como cultivo (Zhang, F. et al., 2021).	Como resultado del estudio se obtuvo que, si bien el biocarbón es uno de los materiales de mayor eficiencia y una de las alternativas mayormente sostenibles en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, su uso puede conducir a que la adsorción e inmovilización de los HAP se reduzca o inhiba (Zhang, F. et al., 2021).
Mechanism of biochar as a biostimulation strategy to remove polycyclic aromatic hydrocarbons from heavily contaminated soil in a coking plant	Zhang, G., He, L., Guo, X., Han, Z., Ji, L., He, Q., Han, L., & Sun, K. (2020). <i>Geoderma</i> , 375, 114497.	Se evaluó el potencial de remediación a escala de laboratorio de suelos contaminados con hidrocarburos a partir de la aplicación de biocarbón en una planta de coquización. Las muestras de suelo contaminadas con hidrocarburos en una proporción de 857 ± 162 mg/kg fueron obtenidas de una planta de coquización de la ciudad Changzhi, Provincia Shanxi, China. Para la obtención del biocarbón se emplearon cáscaras de nuez, mazorcas de maíz, tallos de maíz y paja de arroz pirolizados a 250 °C, 400 °C y 600 °C durante 4 horas, los cuales fueron provistos al suelo en proporciones de 0% y 2% (p/p), con un periodo de incubación de 180 días a 28 °C (Zhang, G. et al., 2020).	En general, se obtuvieron eficiencias de remoción de HAP con 2 a 6 anillos entre un 3,0 % y un 60,3 % en comparación con las muestras de control. Las mayores tasas de remediación se dieron al emplear el biocarbón obtenido de paja de arroz pirolizado a 600 °C por su alto contenido de minerales inorgánicos, oscilando entre 40,00 % y 58,84 % (Zhang, G. et al., 2020). Tras la aplicación del biocarbón se evidenció que se estimuló la abundancia microbiana (bacterias, especialmente del género <i>Acidobacteria</i>) y la diversidad (bacterias y hongos) (Zhang, G. et al., 2020).

Continúa

Continuación Tabla 1. Casos de estudio de bioestimulación y adsorción con el uso de biocarbón para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Improving benzo(a)pyrene biodegradation in soil with wheat straw-derived biochar amendment: Performance, microbial quantity, CO ₂ emission, and soil properties	Guo, J., Yang, S., He, Q., Chen, Y., Zheng, F., Zhou, H., Hou, C., Du, B., Jiang, S., & Li, H. (2021). <i>Journal of Analytical and Applied Pyrolysis</i> , 156, 105132.	Desarrollaron un estudio en el que se evidenció el efecto producido por la aplicación de biocarbón en tratamientos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, específicamente con benzo(a)pireno (BaP), compuesto altamente hidrofóbico que se seleccionó como contaminante y se agregó a una muestra de suelo proveniente de Chengdu University of Information Technology, en una proporción de 42,6 mg/kg. El biocarbón seleccionado correspondió a paja de trigo recolectada de una plantación de trigo en la ciudad de Fanshi, China, piroлизован en un horno de mufla sin aire a 500 °C durante 2 horas (Guo, J. et al., 2021).	Los resultados mostraron que cuando se agregó 2 % (p/p)-10 % (p/p) de biocarbón, la eficiencia de biodegradación del BaP fue de 35,4 % a 86,6 %, que es mucho mayor que la de la remediación obtenida en la muestra control o sin tratamiento con atenuación natural (23,5 %) (Guo, J. et al., 2021). Al respecto, tras la aplicación del biocarbón se evidenció que hubo un aumento notable en la comunidad microbiana de alrededor de 3.3x10 ⁹ a 1.8x10 ¹⁰ unidades formadoras de colonias (UFC)/g-suelo, a la vez que aumentaron las emisiones de CO ₂ en un orden de 195,6 a 496,2 mg-C/kg-suelo, el pH del suelo aumentó entre 0,4 y 1,7 unidades y el contenido de materia orgánica del suelo aumentó entre 2,7 y 9,6 veces. Adicionalmente, la actividad de las enzimas del suelo aumentó entre un 27,5 % y un 70,2 %, de manera que la actividad de la polifenol oxidada aumentó entre un 26,6 % y un 69,1 % (Guo, J. et al., 2021).
Effects of biochar and organic substrates on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structure in PAHs-contaminated soils	Bao, H., Wang, J., Zhang, H., Li, J., Li, H., & Wu, F. (2020). <i>Journal of Hazardous Materials</i> , 385, 121595.	El experimento se desarrolló por macetas y para ello se tomaron muestras de suelo agrícola de 0-20 cm de profundidad de campos agrícolas cercanos a una central eléctrica de carbón en Xí'an, provincia de Shaanxi, China. La paja de maíz se recolectó de suelos agrícolas no contaminados en Yangling, provincia de Shaanxi, China. El biocarbón, los residuos de hongos y el compost fueron proporcionados por Shanghai Hainuo Charcoal Co., Ltd., por una granja en Yangling y por Northwest A&F University, respectivamente (Bao et al., 2020).	Luego de 77 días de incubación, con una aplicación del 5 % (p/p) de biocarbón y sustancias orgánicas al suelo, se registraron tasas de eliminación de HAP de 72,69 % en el tratamiento con biocarbón y paja de maíz, 69,67 % en el tratamiento con biocarbón y residuos de hongos, 53,02 % en el tratamiento de biocarbón y compost, 61,41 % en el tratamiento exclusivo con biocarbón y 57,97 % con la adición de sustratos orgánicos (Bao et al., 2020).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Casos de estudio de bioestimulación y bioaumentación con el uso de biocarbón para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Bioremediation of petroleum Hydrocarbon contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar	Zhang, B., Zhang, L., & Zhang, X. (2019). <i>Royal Society of Chemistry</i> , 9, 35304-35311.	Se estudió la influencia de las propiedades del biocarbón en la bioestimulación, bioaumentación y adsorción de hidrocarburos presentes en una muestra de suelo recolectado del campo petrolero Shengli de China. El suelo se encontraba contaminado con 49,87% de hidrocarburos saturados, 26,02% de hidrocarburos aromáticos, 17,88% de coloides y 5,63% de asfaltenos y se empleó biocarbón derivado del sustrato de champiñón obtenido de Qingdao, China, producido con pirólisis a 550 °C durante 3 horas.	Con un tiempo de residencia de 60 días, se obtuvo una degradación de 13,66 g Kg ⁻¹ en la bioestimulación con biocarbón, de 17,68 g Kg ⁻¹ en la bioaumentación con microorganismos y de 26,85 g Kg ⁻¹ en la combinación de bioestimulación y bioaumentación (Zhang, B. et al., 2019).
Specific enrichment of hydrocarbonclastic bacteria from diesel-amended soil on biochar particles	Assil, Z., Esegbue, O., Mašek, O., Gutierrez, T., & Free, A. (2021). <i>Science of the Total Environment</i> , 762, 143084	Se emplearon muestras de suelo estándar 2,3 (0,66% de carbono orgánico) provistas por Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt - LUFA (Speyer, Alemania), al que se le agregó diésel comercial. El biocarbón fue producido con gránulos de madera blanda y cáscara de arroz a temperaturas de pirólisis de 550 °C o 700 °C.	Los resultados presentados hacen referencia a la modificación en la composición de la comunidad microbiana endógena y la degradación de hidrocarburos en el microcosmos del suelo contaminado con diésel. En particular, se observó que este tipo de contaminación genera a corto plazo la pérdida de la diversidad microbiana del suelo, mientras que el biocarbón la reduce al generar bioestimulación. A largo plazo (9 semanas) cambia la composición de la comunidad de una manera específica, que favorece el auge de microorganismos hidrocarbonoclasticos que pueden bioaumentar las comunidades microbianas endógenas, dentro de los que destacan <i>Rhodococcus</i> , <i>Aquabacterium</i> y <i>Cavicella</i> (Assil et al., 2021).
Combination of biochar amendment and mycoremediation for polycyclic aromatic hydrocarbons immobilization and biodegradation in creosote-contaminated soil	García-Delgado, C., Alfaro-Barta, I., & Eymar, E. (2015). <i>Journal of Hazardous Materials</i> , 285, 259-266.	Se compararon los efectos del biocarbón en la sorción y bioaccesibilidad de los contaminantes presentes en muestras de un suelo agrícola de tierras altas contaminado con fenantreno, pireno, zinc y plomo, derivados del contacto con cresota durante más de 40 años a una profundidad de 0 cm a 20 cm en un área cercana a una planta siderúrgica en el suburbio de Nanjing, provincia de Jiangsu, China. A su vez, se investigó la influencia del biocarbón en la estructura de la comunidad microbiana. Para ello se empleó un biocarbón derivado de paja de maíz y otro de bambú, mezclados manualmente en 3 kg de suelo en proporciones de 15 g (0,5%) o 60 g (2%) en una caja de almacenamiento (García-Delgado et al., 2015).	Se determinó que los tratamientos de atenuación natural con biocarbón no lograron reducciones significativas en la concentración de los contaminantes ni de su ecotoxicidad, a la vez que la bioestimulación generó un buen desarrollo bacteriano pero una baja tasa de eliminación. Por su parte, la microrremediación logró la mejor tasa de degradación y la ecotoxicidad más baja, aunque la actividad de <i>P. ostreatus</i> aumentó con la aplicación previa de biocarbón y se incrementó la eficiencia de degradación (42%). Esto permitió demostrar que la estrategia de remediación combinada tiene un alto potencial para aumentar su eficiencia (71%) (García-Delgado et al., 2015).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Casos de estudio de uso de biocarbón en asocio con fitorremediación para remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Combined application of biochar, compost, and bacterial consortia with Italian ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil	Hussain, F., Hussain, I., Khan, A. H. A., Muhammad, Y. S., Iqbal, M., Soja, G., Reichenauer, T. G., Zeshan, & Yousaf, S. (2018). <i>Environmental and Experimental Botany</i> , 153, 80-88.	Se empleó una muestra de suelo limpio (sin contaminación por hidrocarburos) recolectada de los campos agrícolas de la Universidad Quaid-i-Azam, Islamabad, Pakistán. A su vez, se enriqueció parte de dicho suelo con 3,4 % (p/p) de crudo; este porcentaje fue seleccionado luego de analizar muestras de suelo recolectadas de una refinería de petróleo donde históricamente se ha encontrado suelo contaminado con TPH (Hussain et al., 2018). Posteriormente, el suelo contaminado se sometió a tratamiento con biocarbón (derivado de la pirólisis de residuos de jardín a 500 °C durante 120 minutos, obtenido del Instituto de Tecnología de Austria AIT, Tulln, Austria) y con compost (obtenido del departamento de horticultura del Centro Nacional de Investigación Agrícola, Islamabad, Pakistán) en un 5% v/v de cada uno durante un tiempo de residencia de 75 días (Hussain et al., 2018).	Las cepas microbianas seleccionadas, aisladas e inoculadas en el suelo fueron <i>Pseudomonas poae</i> , <i>Actinobacter bouvetii</i> , <i>Stenotrophomonas rhizophila</i> y <i>Pseudomonas rhizosphaerae</i> . Asimismo, se sembraron semillas de pasto raigrás italiano (<i>Lolium multiflorum</i>) (Hussain et al., 2018). Como resultado de la combinación de biocarbón, compost y el consorcio bacteriano se observó una eficiencia de remoción aproximada de 65 %, a partir de la bioestimulación con biocarbón; de 70 % a partir de la bioestimulación con compost; de 75 % por la bioaumentación con microorganismos; de 78 % con una mezcla entre biocarbón y bioaumentación; de 85 % con una mezcla entre biocarbón y compost, y de 85 % con una mezcla entre biocarbón, compost y bioaumentación (Hussain et al., 2018).
Combination of rhamnolipid and biochar in assisting phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using <i>Spartina anglica</i>	Zhen, M., Chen, H., Liu, Q., Song, B., Wang, Y., & Tang, J. (2019). <i>Journal of Environmental Sciences (China)</i> , 85, 107-118.	Se evaluó el efecto de la aplicación de biocarbón y ramnolípido en combinación con fitorremediación con la planta <i>Spartina anglica</i> en la remoción de hidrocarburos de suelos contaminados.	Los resultados obtenidos en la remediación de muestras de suelo contaminado con crudo (30 g/kg) tras 60 días de residencia en un suelo no plantado con <i>Spartina anglica</i> , en un suelo plantado, en un suelo plantado con adición de biocarbón, en un suelo plantado con adición de biocarbón y ramnolípidos y en un suelo plantado con adición de biocarbón modificado con ramnolípidos. Las eficiencias de remoción fueron de 8,6 %, 19,1 %, 27,7 %, 32,4 % y 35,1 %, respectivamente (Zhen et al., 2019).

Continúa

Continuación Tabla 3. Casos de estudio de uso de biocarbón en asocio con fitorremediación para remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Título	Autores	Metodología	Resultados
Biochar and <i>Bacillus</i> sp. MN54 Assisted Phytoremediation of Diesel and Plant Growth Promotion of Maize in Hydrocarbons Contaminated Soil	Ali, M. H., Khan, M. I., Bashir, S., Azam, M., Naveed, M., Qadri, R., Bashir, S., Mehmood, F., Shoukat, M. A., Li, Y., Alkahtani, J., Elshikh, M. S., & Dwiningsih, Y. (2021). <i>Agronomy (Basel)</i> , 11(9), 1795.	Se emplearon muestras de suelo con dimensiones de 26 × 20 × 20 cm, contaminadas artificialmente con diésel al 1% (p/v) (Ali et al., 2021). El biocarbón fue obtenido de la pirólisis de bagazo de caña a 400 °C; el consorcio microbiano empleado fue <i>Bacillus</i> sp. MN54, tomado del Soil and Environmental Microbiology Lab of ISES, UAF, previamente identificado de la rizósfera del maíz y caracterizado como hidrocarbonoclastico, así como microorganismo promotor del crecimiento vegetal (Ali et al., 2021). A su vez, se emplearon semillas de maíz (<i>Zea mays</i> L.), variedad Malka-2002, obtenidas del Ayoub Agriculture Research Institute (AARI), Faisalabad, Pakistan (Ali et al., 2021).	Dentro de los principales resultados se destaca que la contaminación con hidrocarburos genera una reducción significativa en la emergencia de las semillas en germinación (alrededor del 33%), en la reducción de la raíz (43%), en la cantidad de hojas (47%), en el número de espigas (51%) y en el peso fresco y seco de las raíces (33% y 40%) en comparación con las muestras de control. A su vez, reduce la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones de 56%, 51% y 42% (Ali et al., 2021). Así, la aplicación individual de biocarbón y <i>Bacillus</i> sp. MN54, junto con las plantas, mostró un 33% y un 38% más de eliminación de hidrocarburos con respecto a las muestras sin plantas (sin plantas, pero con biocarbón y <i>Bacillus</i> sp. MN54), respectivamente (Ali et al., 2021). Finalmente, la aplicación combinada de biocarbón y <i>Bacillus</i> sp. MN54 mostró una eliminación general de hidrocarburos del 77%, en comparación con la concentración inicial (Ali et al., 2021).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Casos de estudio de uso de biocarbón para remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y celdas de combustible microbiano

Título	Autores	Metodología	Resultados
Long-term effect of biochar amendment on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil microbial fuel cells	Li, X., Li, Y., Zhang, X., Zhao, X., Sun, Y., Weng, L., & Li, Y. (2019). <i>The Science of the Total Environment</i> , 651(1), 796-806.	Se estudia la aplicación de biocarbón en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos totales y la generación de electricidad en celdas de combustible microbiano a partir de tecnología bioelectroquímica, en la que el biocarbón se desempeña como material de electrodo. Se reconoció que la adición de biocarbón acelera el enriquecimiento y mejoramiento selectivo de la diversidad bacteriana hidrocarbonoclastica, al comparar diferentes tipos de biocarbón, como el estiércol de pollo derivado de la industria avícola (CB), la paja de trigo como residuo agrícola (SB) y el aserrín resultante de labores silviculturales (WB), obtenidos con pirólisis a 600 °C (Li, X. et al., 2019).	Después de 233 días de enmienda, como resultado se obtuvieron las siguientes eficiencias de remoción: 67% (CB) en la que se destacó una mayor remoción de alcanos y se vio favorecida la abundancia microbiana por el alto contenido de fósforo, 38% (SB) con una mayor remoción de hidrocarburos aromáticos, materiales polares y asfaltenos, debido al alto contenido de nitrógeno y finalmente un 36% (WB) con la mayor polaridad molecular (fracción O/C) (Li, X. et al., 2019)

Fuente: elaboración propia.

Es evidente que ha iniciado una nueva era en búsqueda de técnicas de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, entre las cuales se encuentra el uso de biocarbón como biorremediador. El crecimiento económico de los últimos años junto con la explotación de los recursos naturales y sus consecuencias ambientales han llevado al hombre a reflexionar sobre sus hábitos de producción y consumo. Es aquí donde surge la nueva visión de reingresar los residuos a las cadenas productivas e implementar una economía circular, como la aplicabilidad de la biomasa residual de procesos agrícolas en la obtención de biocarbón para diferentes usos. Uno de estos usos se centra en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a partir de la técnica de pirólisis de residuos de biomasa.

A partir de los casos de estudio relacionados se evidenció que las aplicaciones del biocarbón como método de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos son diversas y presentan enfoques variados. Esto resalta su aplicabilidad como adsorbente, acondicionador del suelo, bioestimulador de la microbiota edáfica autóctona y como sustrato que permite generar un ambiente óptimo para el desarrollo y la supervivencia de los consorcios bacterianos hidrocarbonoclasticos. Todas estas aplicaciones funcionan por separado, en asociación o con la combinación de otro tipo de sustratos orgánicos como el compost.

Del mismo modo, se observa que en la mayoría de las investigaciones sobresale el uso de biocarbón obtenido a partir de biomasa seca (bagazo de caña, paja de maíz, paja de trigo) de las cuales se obtienen buenos rendimientos a la hora de ser aplicados en suelos contaminados. De manera que, comparado con las investigaciones que emplean biomasa húmeda, son pocos los estudios referentes en esta aplicabilidad, puesto que normalmente la biomasa húmeda se emplea para procesos fermentativos y producción de biogás. No obstante, se desconoce si el biocarbón obtenido de biomasa húmeda tenga tasas de degradación similares al obtenido de la biomasa seca.

Otro punto importante es la interacción del uso de biocarbón junto con otros procesos de remediación (fito- y microremediación), lo más relevante es la combinación de estas técnicas con el propósito de obtener mayores porcentajes de degradación. Cada

técnica por separado logra buenas tasas de degradación, entre el 38% y 64%, sin embargo, los estudios que presentan la asociación de métodos logran tasas de degradación entre el 70% y 85%, por lo tanto, se ve una nueva tendencia alrededor del uso de biocarbón mezclado con inóculos de diferentes grupos de bacterias u hongos, para indagar nuevas variables y correlaciones entre tipos de microorganismos y clases de biocarbón obtenido a partir de diferentes residuos agrícolas. Del mismo modo, se presentan buenos resultados con la siembra de diferentes especies de plantas sobre los suelos contaminados con hidrocarburos, por ejemplo: especies de maíz, de herbajes e incluso compost derivados de hortalizas. Aquí se abre un nuevo campo de estudios, puesto que luego de aplicar el biocarbón y sembrar las especies vegetales se debe pensar en la disposición final de las legumbres que crecieron en el suelo contaminado, debido a que no son aptas para consumo humano, ni consumo animal. Se deben proponer estudios que analicen la cantidad de contaminantes adquiridos por parte de estas especies y la correcta prevención final.

Finalmente, se debe traer a colación una variable fundamental en todos los casos de estudio: el tiempo de aplicación de la técnica de remediación con biocarbón. Se observa que el tiempo cumple una función fundamental en la biorremediación, pues la mínima duración en los casos de estudio es de 60 días y la máxima de 233, pero la mayoría se llevan a cabo en un transcurso de 60 a 77 días. Es importante analizar esta variable, porque en tipos de remediaciones donde se emplean recursos biológicos se debe evaluar la relación de costo/beneficio al prolongar por tanto tiempo un proceso, y mirar su rentabilidad a la hora de comparar con técnicas actuales.

Conclusiones

Se reconoció que el biocarbón presenta un alto potencial para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos gracias a sus características fisicoquímicas (superficie específica, alta porosidad, presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno, pH alcalino (7,3-10,9), capacidad de adsorción y capacidad de intercambio catiónico), que le permiten desempeñarse favorablemente en

aplicaciones de acondicionamiento de suelos, como adsorbente e inmovilizador por adsorción física de los hidrocarburos al reducir su transporte químico y biodisponibilidad. El biocarbón se asocia con técnicas como la bioestimulación de la microbiota edáfica autóctona o en procesos de bioaumentación de especies hidrocarbonocásticas que participan en los procesos de síntesis y meteorización de los contaminantes a través de sus actividades enzimáticas y diferentes rutas metabólicas. Además, se debe resaltar que este material provee nutrientes, capacidad de retención de agua, oxígeno y condiciones ambientales favorables para el desarrollo y supervivencia de los microorganismos.

Las variables que se deben tener en cuenta al momento de realizar un proceso de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos con biocarbón son: tipo de hidrocarburo involucrado; tipo de suelo y su caracterización fisicoquímica; área superficial del derrame; tipo de tratamiento (remediación con solo biocarbón o combinada con alguna especie vegetal (fitoremediación) o inoculación de microorganismos (microremediación); tiempo de aplicación del tratamiento, y concentración del producto a utilizar.

A su vez, como se puede observar en los diferentes casos de estudio, los tratamientos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos pueden combinar varios enfoques, cuyo efecto sinérgico resulta en la mejora del rendimiento y en mayores eficiencias de remoción de los contaminantes. Entre estos enfoques destacan la combinación de biocarbón con métodos de bioaumentación (71% de remoción del contaminante), con métodos de fitoremediación (77% de remoción del contaminante) o en conjunto con otros sustratos como el compost (85% de remoción del contaminante).

Finalmente, se reconoce que el empleo del biocarbón como estrategia de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos posee ventajas a nivel económico, técnico y ambiental.

Contribuciones de autoría: Investigación, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Metodología, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Administración de proyectos, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Validación, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Visualización, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Redacción del borrador original, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya; Redacción: revisión y edición, A. Ortega-Ramírez y M. Olaya.

Conflictos de interés: El manuscrito fue preparado y revisado exclusivamente por las autoras, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados

Bibliografía

- Abbas, Z., Ali, S., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Malik, A., Riaz, M. A., Shahid, M. R., Rehman, M. Z. u., & Al-Wabel, M. I. (2018). A critical review of mechanisms involved in the adsorption of organic and inorganic contaminants through biochar. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*(16), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3790-1>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere (Oxford)*, *99*, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Ajona, M., & Vasanthi, P. (2021). Bioremediation of petroleum contaminated soils – A review. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 7117-7122. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.matpr.2021.01.949>
- Ali, M. H., Khan, M. I., Bashir, S., Azam, M., Naveed, M., Qadri, R., Bashir, S., Mehmood, F., Shoukat, M. A., Li, Y., Alkahtani, J., Elshikh, M. S., & Dwiningsih, Y. (2021). Biochar and Bacillus sp. MN54 Assisted Phytoremediation of Diesel and Plant Growth Promotion of Maize in Hydrocarbons Contaminated Soil. *Agronomy (Basel)*, *11*(9), 1795. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091795>
- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F. H., Franzetti, A., & Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, *293*, 133572. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>
- Anae, J., Ahmad, N., Kumar, V., Thakur, V. K., Gutierrez, T., Yang, X. J., Cai, C., Yang, Z., & Coulon, F. (2021). Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives. *The Science of the Total Environment*, *767*, 144351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351>
- Assil, Z., Esegbue, O., Mašek, O., Gutierrez, T., & Free, A. (2021). Specific enrichment of hydrocarbonclastic bacteria from diesel-amended soil on biochar particles. *Science of the Total Environment*, *762*, 143084. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2020.143084>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). ATSDR's Substance Priority List. <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/>

- Bao, H., Wang, J., Zhang, H., Li, J., Li, H., & Wu, F. (2020). Effects of biochar and organic substrates on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structure in PAHs-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121595. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121595>
- Bianco, F., Race, M., Papirio, S., Oleszczuk, P., & Esposito, G. (2021). The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAH-contaminated sediments. *Chemosphere*, 263, 128274. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.chemosphere.2020.128274>
- Dike, C. C., Shahsavari, E., Surapaneni, A., Shah, K., & Ball, A. S. (2021). Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? *Environment International*, 154, 106553. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.envint.2021.106553>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- García-Delgado, C., Alfaro-Barta, I., & Eymar, E. (2015). Combination of biochar amendment and mycoremediation for polycyclic aromatic hydrocarbons immobilization and biodegradation in creosote-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 285, 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.002>
- Guo, J., Yang, S., He, Q., Chen, Y., Zheng, F., Zhou, H., Hou, C., Du, B., Jiang, S., & Li, H. (2021). Improving benzo(a)pyrene biodegradation in soil with wheat straw-derived biochar amendment: Performance, microbial quantity, CO₂ emission, and soil properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105132. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105132>
- Guo, S., Liu, X., & Tang, J. (2022). Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons by immobilizing multiple bacteria on wheat bran biochar and its effect on greenhouse gas emission in saline-alkali soil. *Chemosphere*, 286, 131663. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.chemosphere.2021.131663>
- Hussain, F., Hussain, I., Khan, A. H. A., Muhammad, Y. S., Iqbal, M., Soja, G., Reichenauer, T. G., Zeshan, & Yousaf, S. (2018). Combined application of biochar, compost, and bacterial consortia with Italian ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.012>
- Ji, M., Wang, X., Usman, M., Liu, F., Dan, Y., Zhou, L., Campanaro, S., Luo, G., & Sang, W. (2022). Effects of different feedstocks-based biochar on soil remediation: A review. *Environmental Pollution* (1987), 294, 118655. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118655>
- Kong, L., Song, B., Zhang, T., Gao, K., & Liu, J. (2021). Effects of soil organic matter on biochar application in developing the biodegradation potentials of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Applied Soil Ecology*, 167, 104046. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.apsoil.2021.104046>
- Li, G., Chen, F., Jia, S., Wang, Z., Zuo, Q., & He, H. (2020). Effect of biochar on Cd and pyrene removal and bacteria communities variations in soils with culturing ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Environmental Pollution* (1987), 265, 114887. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114887>
- Li, X., Li, Y., Zhang, X., Zhao, X., Sun, Y., Weng, L., & Li, Y. (2019). Long-term effect of biochar amendment on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil microbial fuel cells. *The Science of the Total Environment*, 651(1), 796-806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.098>
- Liu, Y., Lonappan, L., Brar, S. K., & Yang, S. (2018). Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: A review. *Science of the Total Environment*, 645, 60-70. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2018.07.099>
- Mansoor, S., Kour, N., Manhas, S., Zahid, S., Wani, O. A., Sharma, V., Wijaya, L., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., El-Serehy, H. A., Paray, B. A., & Ahmad, P. (2021). Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*, 271, 129458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129458>
- Matustik, J., Hnatkova, T., & Koci, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- Mazarji, M., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Barakhov, A., Barbashev, A., Dudnikova, T., Lobzenko, I., & Giannakis, S. (2022). Decrypting the synergistic action of the Fenton process and biochar addition for sustainable remediation of real technogenic soil from PAHs and heavy metals. *Environmental Pollution* (1987), 303, 119096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119096>
- Meyer, D. D., Beker, S. A., Bucker, F., Peralba, Maria do Carmo Ruaro, Guedes Frazzon, A. P., Osti, J. F., Andrezza, R., Anastácio de Oliveira Camargo, Flávio, & Bento, F. M. (2014). Bioremediation strategies for diesel and biodiesel in oxisol from southern Brazil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 356-363. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.ibiod.2014.01.026>
- Oleszczuk, P., Rakowska, M., Bucheli, T. D., Godlewska, P., & Reible, D. D. (2019). Combined Effects of Plant Cultivation and Sorbing Carbon Amendments on Freely Dissolved PAHs in Contaminated Soil.

- Environmental Science & Technology*, 53(9), 4860–4868. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06265>
- Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100526. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.eti.2019.100526>
- Partovinia, A., & Rasekh, B. (2018). Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments. *Null*, 48(1), 1–38. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1439652>
- Qiao, K., Tian, W., Bai, J., Dong, J., Zhao, J., Gong, X., & Liu, S. (2018). Preparation of biochar from *Enteromorpha prolifera* and its use for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from aqueous solution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 149, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.027>
- Rombolà, A. G., Fabbri, D., Baronti, S., Vaccari, F. P., Genesio, L., & Miglietta, F. (2019). Changes in the pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil treated with biochar from a multiyear field experiment. *Chemosphere (Oxford)*, 219, 662–670. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.178>
- Saeed, M., Ilyas, N., Jayachandran, K., Gaffar, S., Arshad, M., Sheeraz Ahmad, M., Bibi, F., Jeddi, K., & Hesini, K. (2021). Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 2667–2676. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.sjbs.2021.03.044>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Valizadeh, S., Lee, S. S., Choi, Y. J., Baek, K., Jeon, B., Andrew Lin, K., & Park, Y. (2022). Biochar application strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons removal from soils. *Environmental Research*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113599>
- Varma, A. K., Shankar, R., & Mondal, P. (2018). A Review on Pyrolysis of Biomass and the Impacts of Operating Conditions on Product Yield, Quality, and Upgradation. *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization* (pp. 227–259). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1307-3_10
- Vijayaraghavan, K. (2019). Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications. *Environmental Technology Reviews*, 8(1), 47–64. <https://doi.org/10.1080/21622515.2019.1631393>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Wei, Z., Wang, J. J., Gaston, L. A., Li, J., Fultz, L. M., DeLaune, R. D., & Dodla, S. K. (2020). Remediation of crude oil-contaminated coastal marsh soil: Integrated effect of biochar, rhamnolipid biosurfactant and nitrogen application. *Journal of Hazardous Materials*, 396, 122595. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122595>
- Wei, Z., Wang, J. J., Meng, Y., Li, J., Gaston, L. A., Fultz, L. M., & DeLaune, R. D. (2020). Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: Ecotoxicity assessment. *Chemosphere (Oxford)*, 253, 126617. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126617>
- Woźniak-Karczewska, M., Lisiecki, P., Białas, W., Owsianiak, M., Piotrowska-Cyplik, A., Wolko, Ł., Ławniczak, Ł., Heipieper, H. J., Gutierrez, T., & Chrzanowski, Ł. (2019). Effect of bioaugmentation on long-term biodegradation of diesel/biodiesel blends in soil microcosms. *Science of the Total Environment*, 671, 948–958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.431>
- Wu, C., Zhi, D., & Yao, B. (2022). Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: A review. *Environmental Research*, 113226. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.envres.2022.113226>
- Wu, Y., Liu, X., Dong, Q., Xiao, M., Li, B., Topalović, O., Tao, Q., Tang, X., Huang, R., Chen, G., Li, H., Chen, Y., Feng, Y., & Wang, C. (2022). Remediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil: Analysis based on Chinese patents. *Chemosphere (Oxford)*, 297, 134173. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134173>
- Xu, Y., & Lu, M. (2010). Bioremediation of crude oil-contaminated soil: Comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), 395–401. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2010.07.038>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Zahed, M. A., Salehi, S., Madadi, R., & Hejabi, F. (2021). Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100055. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.crgsc.2021.100055>
- Zama, E., Reid, B., Arp, H., Sun, G., Yuan, H., & Zhu, Y. (2018). Advances in research on the use of biochar in soil for remediation: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 18(7), 2433–2450. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2000-9>

- Zhang, B., Zhang, L., & Zhang, X. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *Royal Society of Chemistry*, 9, 35304-35311. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/RA/C9RA06726D#fig1>
- Zhang, F., Zhang, G., & Liao, X. (2021). Negative role of biochars in the dissipation and vegetable uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an agricultural soil: Cautions for application of biochars to remediate PAHs-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112075. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112075>
- Zhang, G., He, L., Guo, X., Han, Z., Ji, L., He, Q., Han, L., & Sun, K. (2020). Mechanism of biochar as a biostimulation strategy to remove polycyclic aromatic hydrocarbons from heavily contaminated soil in a coking plant. *Geoderma*, 375, 114497. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114497>
- Zhen, M., Chen, H., Liu, Q., Song, B., Wang, Y., & Tang, J. (2019). Combination of rhamnolipid and biochar in assisting phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using *Spartina anglica*. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 85, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.013>
- Zhou, X., Shi, L., Moghaddam, T. B., Chen, M., Wu, S., & Yuan, X. (2022). Adsorption mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons using wood waste-derived biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 128003. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128003>