

# Comparación de métodos térmicos para remediar suelos contaminados con hidrocarburos: una revisión sistemática

## Comparison of thermal methods for the remediation of hydrocarbon contaminated soils: A systematic review

Cristian Aguilar<sup>1</sup> , Kiara Zárate<sup>1</sup> , Katherine Chira<sup>1</sup> ,  
Giacomo Velasco<sup>1</sup> , Joaquin Larrea<sup>1</sup>  y Yaneth Vasquez<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.



**Citar como:** Aguilar *et al.* (2025). «Comparación de métodos térmicos para remediar suelos contaminados con hidrocarburos: una revisión sistemática». *South Sustainability*, 6(1), e116.  
DOI: 10.21142/SS-0601-2025-e116

Artículo recibido: 10/9/2024  
Revisado por pares  
Artículo aceptado: 6/1/2025



© Los autores, 2024. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

\* E-mail de correspondencia:  
yvasquez@cientifica.edu.pe

### RESUMEN

La contaminación del suelo por hidrocarburos se ha convertido en una creciente preocupación ambiental a nivel mundial. La presencia de estos compuestos en el suelo puede alterar sus propiedades fisicoquímicas, y así afectar su estructura, porosidad y capacidad de retención de agua. Además, los hidrocarburos pueden ser tóxicos para los organismos del suelo, lo que inhibe la actividad microbiana y perjudica a las plantas y animales que dependen de este recurso. Este artículo de revisión analizó diversas técnicas de remediación térmica para suelos contaminados con hidrocarburos, comparando su eficiencia. Para llevar a cabo este análisis, se seleccionaron 98 artículos científicos de cuartiles Q1 y Q2 de bases de datos como Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Wiley y MDPI, utilizando los operadores booleanos «Techniques» AND «Remediation» AND «Hydrocarbons». La revisión se centró en extraer y comparar parámetros comunes como el tipo de suelo, el hidrocarburo estudiado, el porcentaje de remoción y la energía utilizada en las investigaciones. Entre las técnicas analizadas se encuentran la desorción térmica, el haz de electrones, el calentamiento por resistencia eléctrica (ERH), la electrocinética, la radiación por microondas y la extracción de vapor del suelo. Los resultados cuantitativos destacan la alta eficacia de estas técnicas, con la desorción térmica logrando remociones de hasta el 100 % en ciertos casos. La técnica de haz de electrones mostró tasas de remoción de hasta el 95 % para hidrocarburos en suelos arcillosos, mientras que el ERH alcanzó una eficiencia de remoción del 99,99 % en suelos arenosos limosos. La electrocinética fue efectiva en hasta un 98 % para la remoción de crudo de petróleo, y la radiación por microondas mostró una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles.

**Palabras clave:** Remedación de suelos, técnicas térmicas, hidrocarburos, eficiencia en remediación

### ABSTRACT

Globally, the contamination of soils by hydrocarbons has become a growing environmental concern. The presence of these compounds in soils can alter their physicochemical properties, affecting their structure, porosity and water retention capacity. Additionally, hydrocarbons can be toxic to soil organisms, inhibiting microbial activity and harming plants and animals that depend on this resource. In this article, we analyze a range of thermal remediation techniques for hydrocarbon-contaminated soils, comparing their efficiency. In order to conduct this analysis, 98 scientific articles from quartiles Q1 and Q2 were selected from databases such as Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Wiley and MDPI, employing the Boolean operators "Techniques" AND "Remediation" AND "Hydrocarbons". The review focused on extracting and comparing common parameters such as soil type, the hydrocarbon studied, removal percentage and the energy used in the research. The techniques analyzed included thermal desorption, electron beam irradiation, resistance heating, electrokinetics, microwave radiation and soil vapor extraction. The quantitative results demonstrate the high degree of efficacy of these techniques, with thermal desorption achieving removal rates of up to 100% in certain cases. Electron beam irradiation was up to 95% effective in terms of the removal rate for hydrocarbons in clayey soils, while resistance heating achieved a removal efficiency of 99.99% in silty sandy soils. Electrokinetics was up to 98% effective in the removal of crude oil, while microwave radiation exhibited a high degree of efficiency in the removal of volatile and semi-volatile organic contaminants.

**Keywords:** Soil remediation, thermal techniques, hydrocarbons, remediation efficiency



## Introducción

La contaminación del suelo por hidrocarburos es una problemática ambiental de creciente preocupación a nivel global (Smith *et al.*, 2020). Los hidrocarburos, compuestos orgánicos formados sobre todo por carbono e hidrógeno, se obtienen fundamentalmente del petróleo y sus derivados (Johnson *et al.*, 2021), donde la explotación, el transporte y el almacenamiento conllevan riesgos significativos para el medioambiente (Brown *et al.*, 2022). Los derrames accidentales, las fugas de tanques de almacenamiento y la incorrecta disposición de los residuos industriales son fuentes comunes de contaminación por hidrocarburos, que pueden tener efectos devastadores sobre los ecosistemas terrestres (Lee *et al.*, 2019).

El suelo, como componente clave del medioambiente, juega un papel crucial en la sostenibilidad de los ecosistemas (García-García *et al.*, 2023), ya que actúa como un filtro natural, al degradar y retener contaminantes. Sin embargo, su capacidad de autopurificación tiene sus límites (Williams-Clayson *et al.*, 2024). La presencia de hidrocarburos en el suelo puede alterar sus propiedades físicas y químicas, dentro de ellas la estructura, porosidad y capacidad de retención de agua (Martínez-Hidalgo *et al.*, 2019), hasta el punto de ser tóxicos para la biota del suelo, inhibir la actividad microbiana y afectar negativamente a las plantas y animales que dependen de este recurso (Taylor *et al.*, 2022).

Los efectos nocivos de los hidrocarburos en los suelos son diversos y complejos (Nguyen *et al.*, 2020). Desde una perspectiva ambiental, los hidrocarburos pueden ser transportados a través del suelo por procesos de lixiviación y percolación, contaminando acuíferos y cuerpos de agua superficiales (Perez y Devegowda, 2021). Esto no solo pone en riesgo la calidad del agua potable, sino que también afecta la biodiversidad acuática y terrestre (Sánchez Mata *et al.*, 2023). En términos de salud humana, la exposición a suelos contaminados con hidrocarburos puede provocar efectos adversos, incluyendo enfermedades respiratorias, dermatológicas y, en casos severos, cáncer (Kim *et al.*, 2020). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), una subcategoría de hidrocarburos, son particularmente preocupantes debido a su toxicidad y potencial cancerígeno (Liu *et al.*, 2024).

## Métodos usados en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Existen diversas técnicas de remediación de suelo. Se dividen tradicionalmente en tres: las biológicas, donde microorganismos o plantas transforman, degradan o estabilizan contaminantes (Martínez-Prado *et al.*, 2011); las técnicas físico-químicas, que buscan separar, transformar o inmovilizar los hidrocarburos para reducir su toxicidad o facilitar su extracción (Abdelhafeez *et al.*, 2022); y las técnicas térmicas, que aprovechan el calor para volatilizar, descomponer o destruir los contaminantes presentes en

el suelo (Elijah, 2022). Estas últimas son objeto de este estudio.

- Calentamiento por resistencia eléctrica (ERH): consiste en la aplicación de corriente eléctrica al suelo, generando calor. Por ende, aumenta la volatilización y movilidad de los contaminantes, lo que facilita su remoción (Reddy y Vinu, 2021).
- Desorción térmica: involucra el calentamiento directo del suelo en hornos especiales, ya que vaporiza los contaminantes orgánicos para su posterior captura y tratamiento (Luter *et al.*, 2019)
- Electrocinética: utiliza un campo eléctrico para movilizar contaminantes a través del suelo hacia él (Gidudu y Chirwa, 2022).
- Haz de electrones: implica la irradiación del suelo con electrones de alta energía, al romper los enlaces químicos de los contaminantes y transformarlos en compuestos menos dañinos (Wang *et al.*, 2020).
- Radiación por microondas: promueve la descomposición térmica de los contaminantes con el uso de microondas a diversas temperaturas (Luo *et al.*, 2020).
- Extracción de vapor del suelo (SVE): aplica un vacío para extraer vapores de contaminantes volátiles y semivolátiles del subsuelo, lo que permite su captura y tratamiento en la superficie (Carranza y van der Ploeg, 2020).

En este trabajo se evaluarán diversos parámetros que influyen en la eficiencia de las técnicas de remediación térmica mediante un análisis detallado de investigaciones recientes. Estos parámetros incluyen la temperatura de tratamiento, la duración del proceso, el tipo de suelo, el tipo de hidrocarburo, los residuos generados y el potencial impacto en el ambiente. Por ende, el objetivo de esta revisión sistemática es comparar la efectividad de las técnicas de remediación térmica en suelos contaminados con hidrocarburos.

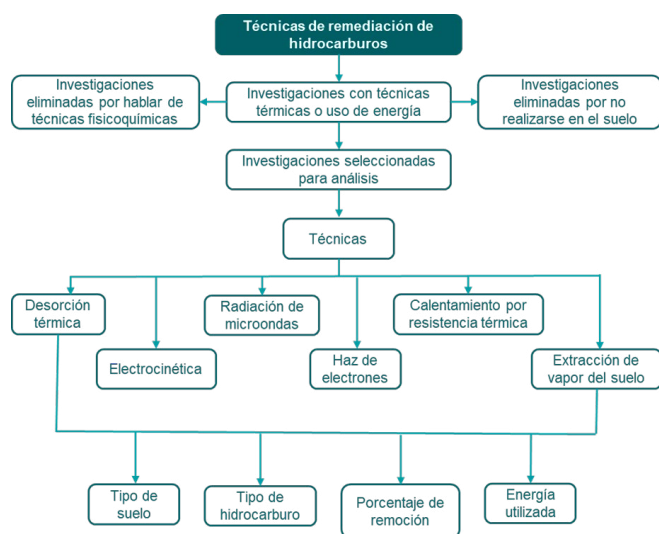
## Metodología de la revisión sistemática

La investigación se centró en la búsqueda de artículos científicos con alto factor de impacto y que desarrollen ensayos de laboratorio en su ejecución. La temática del documento analizado debe ser de tratamiento de hidrocarburos mediante técnicas térmicas o que utilicen energía en el proceso. Para ello, se utilizaron las siguientes palabras clave unidas con operadores booleanos: «Techniques» AND «Remediation» AND «Hydrocarbons». En la selección de los artículos científicos se priorizaron los documentos que presentaban clasificación de artículos de cuartiles Q1 y Q2 dentro de las siguientes bases de datos: Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Wiley y MDPI. Además, se seleccionaron artículos en los que la técnica de remediación se aplicara exclusivamente al componente suelo, excluyendo su aplicación en otros componentes ambientales.

Para el análisis de la información de los artículos, se utilizó una matriz en la que se organizaron los datos

extrayendo criterios comunes de los documentos, tales como tipo de suelo, hidrocarburo estudiado, técnica de remediación, porcentaje de remoción y energía utilizada. Posteriormente, para complementar el análisis, se evaluaron parámetros adicionales, como la temperatura de tratamiento y la duración del proceso para cada tipo de hidrocarburo estudiado, tal como se ilustra en la figura 1.

Se excluyó la información de parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica o capacidad de intercambio catiónico (CIC), debido a su ausencia en la mayoría de las investigaciones analizadas. Finalmente, se examinó dicha información y se compararon los criterios extraídos en función de las diferentes técnicas recopiladas.



**Figura 1.** Metodología aplicada en la revisión sistemática.

La figura 1 presenta los temas abordados en la búsqueda de documentos científicos, incluyendo la selección de los tópicos de investigación. Además, detalla las técnicas y los criterios priorizados en la revisión.

## Resultados y discusión

La investigación se fundamentó en el análisis exhaustivo de 98 artículos científicos que tratan la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante técnicas no convencionales, con un enfoque principal en métodos térmicos. Los resultados se presentan de manera agrupada, organizando la información según la técnica empleada, el tipo de suelo tratado, la eficiencia en la remoción del hidrocarburo y el consumo energético asociado en cada proceso.

### Radiación por microondas

La tabla 1 muestra que 25 artículos emplearon la técnica de radiación por microondas. El crudo fue la sustancia más estudiada, ya que alcanzó porcentajes de remoción del 100 % (Lafaille *et al.*, 2021). En cuanto a los HAP, la mayor tasa de degradación reportada fue del 98,34 % (Wu *et al.*, 2023). Los casos con mayor porcentaje de degradación

de hidrocarburos se lograron con una humedad del 0 %. En contraste, los estudios que consideraron algún porcentaje de humedad mostraron una menor eficiencia en los tratamientos. Esto se debe a que el agua tiene una alta capacidad de absorción de energía de microondas, lo que significa que gran parte de la energía se absorbe por el agua en lugar de tratar los hidrocarburos, y ello reduce la eficacia del proceso de calentamiento y volatilización de los contaminantes (Hosseini *et al.*, 2022).

La presencia de agua en el suelo puede causar una distribución desigual del calor, al generar «puntos calientes» y dificultar el calentamiento uniforme del suelo, lo que afecta la remoción efectiva de los contaminantes (Chien, 2012). Además, la humedad puede alterar las propiedades físicas y químicas del suelo, debido a que afecta su estructura y su capacidad de interactuar con las ondas del microondas, lo que hace que algunos contaminantes sean más difíciles de alcanzar y remover (Falciglia *et al.*, 2016). Otro aspecto importante en la eficiencia en la remoción de hidrocarburos depende de la estructura del contaminante. En el estudio de Xue *et al.* (2022), donde se empleó un mayor porcentaje de humedad (13 %) mediante la destilación con vapor, se observó que los alcanos de cadena lineal o ramificada se degradaron más eficientemente que los alcanos insaturados, ciclo parafinas (como los compuestos de la serie del benceno, compuestos cíclicos y naftalina) y alcoholes. En los estudios analizados se demuestra además que, a mayor tiempo de exposición a la energía irradiada, mayor temperatura y potencia energética, se incrementa la tasa de degradación. Sin embargo, parámetros como la humedad y el tipo de suelo (arenosos, arcillosos o franco-arenosos), influyen significativamente haciendo que varíe la eficiencia del tratamiento.

Se puede afirmar que los suelos arenosos presentan una mayor tasa de degradación de hidrocarburos debido a su baja capacidad de retención de agua, lo que facilita un calentamiento uniforme del suelo y la volatilización de los contaminantes (Falciglia *et al.*, 2017). Además, su alta permeabilidad y porosidad permiten una mejor penetración de las ondas de microondas y una distribución más uniforme del calor (Falciglia *et al.*, 2011). En contraste, el estudio realizado con suelo arcilloso mostró un porcentaje de remediación del 95 % para crudo y HAP. No obstante, requirió una mayor cantidad de energía y un tiempo de exposición prolongado.

Un aspecto importante para considerar de la técnica es que durante el tratamiento de suelos puede liberar compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros subproductos tóxicos si no se consideran todas las variables del tratamiento desde la aplicación misma hasta el manejo del residuo. Estudios recientes han reportado emisiones de hasta 1,5 mg/kg de COV, lo que representa un riesgo ambiental significativo si no se gestionan adecuadamente (Wu *et al.*, 2023). Además, el calor emitido durante el

tratamiento puede elevar la temperatura del suelo hasta 150 °C, lo que podría impactar negativamente la flora y fauna locales y reducir la biodiversidad microbiana hasta en un 30 %, al afectar las funciones ecológicas del suelo (Xue *et al.*, 2023).

La alteración de la estructura del suelo es un aspecto crítico, ya que la exposición a microondas puede disminuir la porosidad del suelo hasta en un 35 %, lo que afecta tanto la cohesión como la capacidad de retención de agua

y nutrientes (Falciglia y Vagliasindi, 2014). Estos cambios pueden comprometer la fertilidad del suelo a largo plazo, especialmente en contextos agrícolas o de restauración ecológica, variable que se debe incluir en un plan de remediación. Además, el uso de radiación por microondas implica un alto consumo energético, ya que alcanza un promedio de 2,8 kWh por kg de suelo tratado, lo que se traduce en emisiones de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 1,8 kg por kWh (Lafaille *et al.*, 2021).

**Tabla 1.** Efectividad de la remoción de hidrocarburos por la técnica de radiación por microondas en diferentes tipos de suelo y energía utilizada en los tratamientos

| Técnica                 | Tipo de hidrocarburo | Tipo de suelo  | Porcentaje de remoción (%) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Energía utilizada (kW) | Duración del tratamiento (min) | Referencia                       |
|-------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Radiación de microondas | Crudo                | Arcilloso      | 95                         | 250              | 20          | 1                      | 60                             | Falciglia <i>et al.</i> (2017)   |
|                         |                      | Arenoso-limoso | 99                         | 600              | -           | 32                     | 180                            | Lee <i>et al.</i> (2019)         |
|                         |                      | Arenoso        | 100                        | 100-600          | 0           | 2                      | 20                             | Lafaille <i>et al.</i> (2021)    |
|                         |                      | Arenoso        | 91,2                       | 600              | 4,9         | 0,6                    | 50                             | Sivagami <i>et al.</i> (2019)    |
|                         |                      |                | 90                         | 450              | 10          | 0,8                    | 10                             | Hosseini <i>et al.</i> (2022)    |
|                         |                      |                | 70                         | -                | -           | 0,1                    | 20                             | Eldos <i>et al.</i> (2020)       |
|                         |                      |                | 61                         | 75               | 12-13       | 2                      | 5760                           | Xue <i>et al.</i> (2022)         |
|                         |                      |                | 87                         | 100              | -           | 0,8                    | 30                             | Cho <i>et al.</i> (2020)         |
|                         |                      | Limoso         | 95                         | 70-100           | -           | 6                      | 50400                          | Krouzek <i>et al.</i> (2018)     |
|                         |                      | No específica  | 94                         | 300              | -           | -                      | 50                             | Hu <i>et al.</i> (2019)          |
|                         |                      |                | 87,7                       | 700              | -           | 0,5                    | 60                             | Krishnasamy <i>et al.</i> (2019) |
|                         |                      |                | 80                         | 315,9            | 2           | 0,7                    | 10                             | Wu <i>et al.</i> (2024)          |
|                         |                      |                | 80                         | 250              | -           | 0,3                    | 50                             | H. Luo <i>et al.</i> (2019)      |
|                         |                      |                | 96                         | 400 - 1100       | 10          | 1                      | -                              | Falciglia <i>et al.</i> (2024)   |
|                         |                      | Procesado      | 94                         | 260              | 12          | 1                      | 60                             | Falciglia y Vagliasindi (2014)   |
|                         |                      |                | 80                         | 220              | -           | 0,7                    | 10                             | Tian <i>et al.</i> (2022)        |
|                         |                      |                | 95                         | 120              | -           | -                      | 20                             | Kariyawasam <i>et al.</i> (2023) |
|                         |                      | HAP            | 95                         | 750              | -           | 1,7                    | 8                              | Robinson <i>et al.</i> (2012)    |
|                         |                      |                | 70                         | -                | -           | 0,1                    | 60                             | Falciglia <i>et al.</i> (2016)   |
|                         |                      |                | 98                         | 300              | -           | 0,7                    | 20                             | Wu <i>et al.</i> (2023)          |
|                         |                      |                | 87                         | 550              | 5-20        | 0,8                    | 10                             | Deng <i>et al.</i> (2024)        |
|                         |                      |                | 92                         | 60               | -           | -                      | 45                             | Wu <i>et al.</i> (2022)          |
|                         |                      |                | 85,6                       | 80               | -           | -                      | 15                             | Kan <i>et al.</i> (2021)         |
|                         |                      |                | 96                         | 590              | 1           | 0,7                    | 20                             | Wu <i>et al.</i> (2022)          |
|                         |                      |                | 93                         | 75               | -           | 0,3                    | 10                             | Feiyue <i>et al.</i> (2023)      |

### Desorción térmica

De los artículos revisados, 15 utilizaron la técnica de desorción térmica (tabla 2). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) fueron el tipo de hidrocarburo en el que más se utilizó esta técnica, al alcanzar porcentajes de remoción de 98 % en la investigación (Hu *et al.*, 2021). En el caso del crudo, la mayor tasa de degradación fue del 100 % en suelo arenoso (Bykova *et al.*, 2021). Finalmente, para el hidrocarburo del tipo procesado, la mayor tasa de degradación fue del 100 % en suelo franco (Shentu *et al.*, 2023).

La desorción térmica es una técnica de remediación que consiste en la aplicación de calor para volatilizar los hidrocarburos y otros compuestos tóxicos, lo que facilita su extracción del suelo. Shentu *et al.* (2023) explican que este método emplea el calor para transformar los contaminantes del suelo en la fase gaseosa, lo cual permite su remoción, y Li *et al.* (2022) destacan que esta técnica puede optimizarse mediante herramientas de evaluación de sostenibilidad, al mejorar su eficiencia.

En suelos arenosos contaminados con crudo, se logró una remoción completa del 100 % de los hidrocarburos a temperaturas entre 25 y 170 °C (Bykova *et al.*, 2021). Este amplio rango de temperatura permite adaptarse a diversas condiciones climáticas, como las de la tundra, taiga y estepa forestal. Además, Xue *et al.* (2023) alcanzaron una remoción del 95,18 % a temperaturas de 150 a 300 °C utilizando la inducción electromagnética, con lo que mostraron la versatilidad de esta tecnología para mejorar la eficiencia de remoción en tiempos de 5 a 60 minutos. Por otro lado, Zivdar *et al.* (2019) aplicaron desorción térmica a 180 °C durante 20 minutos para remediar suelos contaminados con diésel y obtuvieron una eficiencia del 81,40 %, lo que indica que incluso temperaturas moderadas pueden ser efectivas, dependiendo del tipo y grado de contaminación inicial (Wang *et al.*, 2023). Al aplicar la desorción térmica en suelos arcillosos con alto contenido de hidrocarburos, usando temperaturas en un rango de 100 °C a 600 °C, con tiempos de 6 a 60 minutos y potencias de hasta 3200 W, lograron una eficiencia de remoción del 98,69 %, lo que destaca la importancia de ajustar los parámetros de tratamiento según las características específicas del suelo y del contaminante presente.

En otro estudio, Xue *et al.* (2022) lograron una remoción del 41,50 % a temperaturas de 30 °C y 60 °C en 24 horas utilizando activación de persulfato con escoria de horno de oxígeno básico y calentamiento por inducción electromagnética. Asimismo, Zhou *et al.* (2022) investigaron el comportamiento y los mecanismos de desorción a temperaturas variables (120 °C, 160 °C, 200 °C, 240 °C y 280 °C), y obtuvieron una remoción del 16,46 %, lo que subraya la necesidad de optimizar las condiciones de tratamiento para mejorar la eficacia.

La aplicación de desorción térmica en suelos contaminados por hidrocarburos procesados también ha mostrado resultados prometedores. Shentu *et al.* (2023) documentaron una remoción completa del 100 % a 144 °C durante un periodo prolongado de 160 días en un suelo franco, lo que resalta la necesidad de considerar tanto la eficacia de remoción como los efectos a largo plazo en las comunidades microbianas del suelo. Por otro lado, Li *et al.* (2020) utilizaron temperaturas variables (100-600 °C) para alcanzar una remoción del 99,91 % en 30 minutos y una potencia de 3500 W, utilizando un enfoque basado en la fracción de número de carbono, lo que muestra cómo la selección precisa de temperatura puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso *ex situ*.

En cuanto a los HAP, la desorción térmica también ha sido aplicada con éxito. Zhang *et al.* (2024), utilizando un modelo numérico optimizado, reportaron una remoción del 94,90 % a 200 °C en tan solo 8 minutos, lo que subraya la aplicación potencial de técnicas avanzadas para mejorar la precisión y eficiencia del proceso de remediación. Chen *et al.* (2024) lograron una remoción del 80 % a temperaturas de 250 y 400 °C en 60 minutos, utilizando modelos de aprendizaje automático para optimizar los parámetros del proceso.

En suelos arcillosos, Kastanek *et al.* (2016) lograron una remoción del 96,06 % a 380 °C en 6 minutos, donde incorporaron peróxido de benzoilo para mejorar la desorción térmica. Liu *et al.* (2023) combinaron la desorción térmica con surfactantes para degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos subsuperficiales, y lograron una remoción del 90 % a 60 °C en 48 horas. Por ello, se puede afirmar que usar técnicas químicas y el uso de calor asociadas tiene resultados prometedores que se deben seguir investigado.





**Tabla 2.** Efectividad de la remoción de hidrocarburos por la técnica desorción térmica en diferentes tipos de suelo y tiempo de duración del tratamiento

| Técnica           | Tipo de hidrocarburo | Tipo de suelo    | Porcentaje de remoción (%) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Energía utilizada (kW) | Duración del tratamiento (min) | Referencia                   |                               |
|-------------------|----------------------|------------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Desorción térmica | Crudo                | Arenoso          | 100                        | 25-170           | 8,5         | -                      | -                              | Bykova <i>et al.</i> (2021)  |                               |
|                   |                      |                  | 95                         | 150-300          | 0,7         | -                      | 5-60                           | Y. Xue <i>et al.</i> (2023)  |                               |
|                   |                      |                  | 81                         | 180              | 2,1-4,4     | -                      | 20                             | Zivdar <i>et al.</i> (2019)  |                               |
|                   |                      | Franco-arcilloso | 99                         | 100-600          | -           | 3,2                    | 6-60                           | S. Wang <i>et al.</i> (2023) |                               |
|                   |                      |                  | -                          | 30               | 120-280     | -                      | -                              | -                            | Zhou <i>et al.</i> (2022)     |
|                   |                      |                  | -                          | 30               | 30-60       | -                      | -                              | 3600                         | Xue <i>et al.</i> (2022)      |
|                   |                      | HAPs             | Arcilloso                  | 95               | 380         | -                      | -                              | 6                            | Kastanek <i>et al.</i> (2016) |
|                   |                      |                  | Limoso                     | 80               | 60          | 615                    | -                              | 2880                         | Liu <i>et al.</i> (2023)      |
|                   |                      |                  | -                          | 98               | 300         | -                      | -                              | 20                           | Hu <i>et al.</i> (2021)       |
|                   |                      |                  | -                          | 95               | 200         | -                      | -                              | 8                            | Zhang <i>et al.</i> (2024)    |
|                   | -                    |                  | 80                         | -                | -           | -                      | 20-60                          | Chen <i>et al.</i> (2024)    |                               |
|                   | -                    |                  | 70                         | 250-400          | 30          | -                      | 60                             | Chen <i>et al.</i> (2024)    |                               |
|                   | Procesado            | -                | 45                         | -                | -           | -                      | 80 640                         | Zeng <i>et al.</i> (2023)    |                               |
|                   |                      | Franco           | 100                        | 144              | 30          | -                      | 230 400                        | Shentu <i>et al.</i> (2023)  |                               |
|                   |                      | Arcilloso        | 99                         | 100-600          | -           | 3,5                    | 30                             | Li <i>et al.</i> (2020)      |                               |
|                   |                      | No indica        | 90                         | 80-120           | 0.056       | -                      | 570-840                        | Fang <i>et al.</i> (2024)    |                               |

## Electrocinética

La electrocinética (EK) se presenta como una herramienta prometedora para la remediación de suelos, debido a que ofrece una solución viable para una amplia gama de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, e incluso mezclas complejas (Sandu *et al.*, 2016). Su funcionamiento se basa en la aplicación de una corriente de bajo voltaje a través de electrodos insertados en el suelo, lo que genera un campo eléctrico que impulsa la movilización de los contaminantes hacia los electrodos. Entre sus principales ventajas destaca su flexibilidad, ya que puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*, adaptándose a las necesidades específicas del terreno contaminado. Además, resulta efectiva en suelos de baja permeabilidad y heterogéneos, donde otras técnicas tradicionales pueden presentar dificultades. Cabe resaltar que la EK funciona tanto en suelos saturados como insaturados, y así ampliar aún más su rango de aplicabilidad (Saber *et al.*, 2018). En cuanto a su capacidad de tratamiento, la EK ha demostrado ser eficaz en la eliminación de diversos contaminantes de alto impacto ambiental, incluyendo hidrocarburos, metales pesados, radionucleidos y compuestos orgánicos (Asadollahfardi y Rezaee, 2019).

De los 98 artículos científicos revisados, 39 emplearon la electrocinética (tabla 3). El crudo fue la sustancia más

estudiada, al alcanzar porcentajes de remoción de hasta el 98 % (Arumugam *et al.*, 2024). En cuanto a los HAP, se demostró una remoción del 93 % en suelos limosos con un contenido de humedad del 30 % (Adhami *et al.*, 2021).

El éxito de la EK depende en gran medida de dos factores clave, que son la textura y la humedad del suelo. En lo referido a la textura, los suelos arenosos facilitan el movimiento de iones, pero pueden no retener los contaminantes tan bien. Los suelos arcillosos retienen bien los contaminantes, pero presentan problemas para el movimiento eléctrico debido a su baja permeabilidad. Estas son variables que se tienen que considerar al momento de proponerla en un plan de remediación.

Los suelos limosos ofrecen un equilibrio entre retención y permeabilidad, por lo que esta técnica se ajusta mejor a estos suelos (Sandu *et al.*, 2016). Respecto a la humedad, los suelos húmedos permiten un movimiento más libre de iones, lo que aumenta la eficiencia del tratamiento, mientras que los suelos secos presentan mayor resistencia eléctrica, y así reducen la efectividad del proceso y requieren más energía (Abou-Shady y Yu, 2023). En resumen, la combinación adecuada de textura y humedad del suelo es crucial para optimizar tratamientos de remediación con electrocinética.

**Tabla 3.** Efectividad de la remoción de hidrocarburos por la técnica electrocinética en diferentes tipos de suelo y tiempo de duración del tratamiento

| Técnica         | Tipo de hidrocarburo | Tipo de suelo    | Porcentaje de remoción (%) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Energía utilizada (kW) | Duración del tratamiento (h) | Referencia                                        |
|-----------------|----------------------|------------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Electrocinética | Crudo                | Arcilloso        | 59                         | 25               | 1,28        | -                      | 15                           | Liang y Yang (2021)                               |
|                 |                      |                  | 50                         | -                | 24-30       | -                      | 168                          | Effendi <i>et al.</i> (2022)                      |
|                 |                      |                  | 49,9                       | 10-45            | 24-30       | -                      | 168                          | Surya <i>et al.</i> (2022)                        |
|                 |                      |                  | 45                         | -                | 12,6 ± 1,2  | 26,7                   | 240-480                      | Crognale <i>et al.</i> (2020)                     |
|                 |                      |                  | 36                         | 25               | 40          | -                      | 336-360                      | Mena <i>et al.</i> (2016)                         |
|                 |                      |                  | 29                         | -                | 30          | -                      | 336                          | Mena <i>et al.</i> (2015)                         |
|                 |                      |                  | 27                         | 26               | 40          | -                      | 336                          | Mena <i>et al.</i> (2015)                         |
|                 |                      | Areno limoso     | 95                         | -                | -           | -                      | 504                          | Lee <i>et al.</i> (2016)                          |
|                 |                      |                  | 63,86                      | -                | -           | 1,81                   | 168-216                      | Asadollahfardi y Rezaee (2019)                    |
|                 |                      | Franco-arcilloso | 39                         | -                | 25          | -                      | 720                          | Huang <i>et al.</i> (2019)                        |
|                 |                      |                  | 77,4                       | -                | 16,31       | -                      | 720                          | Ma <i>et al.</i> (2018)                           |
|                 |                      | Franco-arenoso   | 70                         | 22               | -           | -                      | 336                          | Ana Rita <i>et al.</i> (2021)                     |
|                 |                      |                  | 70                         | -                | -           | -                      | 144                          | Sandu <i>et al.</i> (2016)                        |
|                 |                      | -                | 98                         | -                | -           | -                      | -                            | Arumugam <i>et al.</i> (2024)                     |
|                 |                      | -                | 83                         | -                | -           | 0,2                    | 0,3                          | Lingamdinne <i>et al.</i> (2024)                  |
|                 |                      | -                | 55                         | -                | -           | -                      | 360-648                      | Popescu <i>et al.</i> (2017)                      |
|                 |                      | -                | 40,45                      | -                | -           | -                      | 168                          | Li <i>et al.</i> (2024)                           |
|                 |                      | Arcilloso        | 80                         | -                | 50          | -                      | 720                          | Alcántara <i>et al.</i> (2012)                    |
|                 |                      |                  | 58                         | -                | -           | -                      | 24                           | Cuevas <i>et al.</i> (2016)                       |
|                 |                      |                  | 55                         | 100              | -           | -                      | 432                          | Niqui-Arroyo y Ortega-Calvo (2010)                |
|                 |                      |                  | 30,72                      | -                | -           | -                      | 72-240                       | Estabragh <i>et al.</i> (2019)                    |
|                 |                      |                  | 77,4                       | 25 ± 2           | -           | -                      | 480                          | Zhang <i>et al.</i> (2024)                        |
|                 | HAP                  | Arcilloso limoso | 81                         | -                | -           | -                      | 96                           | Chu <i>et al.</i> (2022)                          |
|                 |                      |                  | 60                         | 40-50            | 26          | -                      | 240                          | Wen <i>et al.</i> (2023)                          |
|                 |                      |                  | 56                         | 105              | -           | -                      | 168                          | Xu <i>et al.</i> (2014)                           |
|                 |                      | Franco           | 82,8                       | -                | -           | -                      | 360                          | Zhou <i>et al.</i> (2022)                         |
|                 |                      |                  | 65                         | -                | -           | -                      | 600                          | Yuan <i>et al.</i> (2016)                         |
|                 |                      | Franco-arenoso   | 30                         | -                | 15-20       | -                      | 12                           | Zhang <i>et al.</i> (2021)                        |
|                 |                      |                  | 15                         | 25               | 20          | -                      | 2160                         | Li <i>et al.</i> (2012)                           |
|                 |                      | Limoso           | 93                         | -                | 30          | -                      | 480                          | Adhami <i>et al.</i> (2021)                       |
|                 |                      |                  | 80                         | -                | -           | -                      | 1200                         | Ji <i>et al.</i> (2020)                           |
|                 |                      | -                | 60                         | -                | -           | -                      | 648                          | Bocos <i>et al.</i> (2015)                        |
|                 |                      |                  | 35                         | 250-300          | -           | -                      | 1344                         | Kuppusamy <i>et al.</i> (2017)                    |
|                 | Procesado            | Arcilloso        | 79                         | 250              | -           | -                      | 432                          | Parameswarappa Jayalakshamma <i>et al.</i> (2021) |
|                 |                      |                  | 79                         | -                | -           | -                      | 216-432                      | Parameswarappa Jayalakshamma <i>et al.</i> (2021) |
|                 |                      |                  | 37                         | 22-24            | 35          | -                      | 168                          | Saini <i>et al.</i> (2021)                        |
|                 |                      | Arenoso          | 70                         | -                | 46          | -                      | 168                          | (Acosta-Santoyo <i>et al.</i> , 2019)             |
|                 |                      |                  | 55                         | -                | -           | 519                    | 216                          | Asadollahfardi y Rezaee (2019)                    |
|                 |                      | -                | 80                         | -                | -           | 0,2                    | 168                          | Fardin <i>et al.</i> (2021)                       |



## Haz de electrones y ERH

Se identificó que pocos artículos abordan la técnica de haz de electrones y ERH. Sin embargo, los pocos casos analizados entregaron los resultados significativos en la remoción de hidrocarburos, y subrayan la relevancia de estos métodos en la investigación. Específicamente, se identificaron 2 artículos sobre haz de electrones y 4 sobre ERH (tabla 4).

La remediación con haz de electrones es una técnica avanzada que emplea electrones de alta energía para descomponer contaminantes como hidrocarburos, generando radicales libres que facilitan su eliminación o transformación (Apul et al., 2016; Lassalle et al., 2023). Este método presenta varias ventajas significativas, como un calentamiento eficiente sin agitación, lo que reduce tanto el tiempo como el consumo energético (Zaikin y Zaikina, 2016). La eficacia de este proceso varía, con tasas de remoción que oscilan entre el 60 % y el 100 %. Por ejemplo, se ha alcanzado un 95 % de remoción de hidrocarburos en suelos arcillosos a 525 °C y con una humedad del 9,4 %, utilizando 100 000 W de energía (Lassalle et al., 2024). En el caso de hidrocarburos crudos, se logra una remoción del 75 % a 450 °C, tratando partículas menores a 5 mm en 200 segundos y con una humedad entre 0,8 % y 1,4 % (Lassalle et al., 2023).

La tecnología de ERH utiliza corrientes eléctricas trifásicas o hexafásicas para elevar la temperatura del suelo hasta aproximadamente 100 °C (Martin y Kueper, 2011). Este proceso facilita la desorción física de contaminantes sin afectar las propiedades fisicoquímicas del suelo, al promover la volatilización controlada de los contaminantes para su recolección y eliminación, en contraste con la remediación térmica convencional que alcanza temperaturas mucho más altas, alrededor de 300 °C (George et al., 1995; O'Brien et al., 2018). Los estudios indican que la tecnología alcanza eficiencias de remoción significativas, como un 99,99 % en suelos arenosos limosos a 700 °C con un consumo de energía de 6 kW/h durante 48 horas (Kim et al., 2022). Además, logra una remoción del 82,33 % de HAP en suelos franco-arenosos a 200 °C durante 480 minutos (Han et al., 2021), y un 70 % de remoción a 100 °C con un 30 % de humedad en 153 minutos, dentro de un rango de remoción entre el 80 % y el 60 % (Yue et al., 2023). El rendimiento de la remediación con la técnica de haz de electrones está influenciado por diversos parámetros como la humedad, temperatura, presencia de aditivos y la dosis de energía aplicada. En este contexto, la energía emitida por el haz de electrones provoca un rápido calentamiento del suelo, al generar radicales que facilitan la unión entre hidrocarburos y suelo, lo que resulta en la inmovilización del contaminante. Este proceso puede desencadenar varios fenómenos, como la evaporación, polimerización, pirólisis, craqueo térmico y combustión (Imada, 2011).

En el estudio de Lassalle et al. (2023), se observó que el proceso de secado de lodos, que redujo la humedad del 47 % al 1 % en peso, permitió que el haz de electrones alcanzara una temperatura significativamente más alta (570 °C) con una dosis de 670 kW/h. Este incremento en la temperatura mejoró la eficiencia de la técnica, al reducir la concentración de TPH del 31,9 % al 8 %. Estos resultados subrayan la importancia de un pretratamiento adecuado para optimizar el rendimiento de la remediación mediante esta técnica. Además, Vidonish et al. (2018) señalan que la fertilidad del suelo no se ve drásticamente afectada por esta técnica debido a la presencia de productos de pirólisis, también conocidos como carbono fijo.

Este carbono fijo incluye materia orgánica y otras formas de carbono que se generan durante el tratamiento, las cuales contribuyen a mantener la calidad del suelo. A pesar de estos hallazgos prometedores, es necesario destacar que la información disponible sobre la técnica de haz de electrones es todavía limitada. La investigación en esta área debe continuar para comprender mejor los mecanismos involucrados y para optimizar los parámetros operativos que maximicen la eficiencia de la remediación sin comprometer la fertilidad del suelo.

Existe una correlación negativa significativa entre la tasa de eliminación mediante ERH y el punto de ebullición de los HAP. Este comportamiento se debe a que el aumento de la temperatura induce la volatilización de los contaminantes (Costanza et al., 2017; Usman et al., 2012) y su desorción de las partículas del suelo (Tan et al., 2017). Se observó que los contaminantes con concentraciones iniciales más altas tendían a disminuir a menos del 5 % con mayor facilidad (Couling et al., 2010). Además, los HAP con puntos de ebullición más bajos presentaban una mayor volatilidad, lo que facilitaba su eliminación mediante ERH. Por el contrario, los HAP con puntos de ebullición más altos eran más estables debido a su estructura de anillo más fuerte, lo que dificulta su volatilización. Aunque las estructuras de anillo de los HAP pueden romperse por agentes oxidantes (Dadkhah y Akgerman, 2002), esto no fue suficiente para su eliminación significativa en el proceso de ERH.

El contenido de fósforo (P) y potasio (K) disponibles en el suelo aumentó debido a que el P y K adsorbidos se liberan al estado soluble a temperaturas más altas. Además, la descomposición de materia orgánica persistente y microorganismos puede liberar P y K disponibles en el contenido de ceniza soluble (Serrasolses et al., 2008). Estos hallazgos sugieren que la efectividad de la ERH depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas de los HAP, así como de las condiciones del suelo. Por tanto, para mejorar la eficiencia del proceso sería beneficioso considerar la introducción de oxidantes apropiados que podrían reducir significativamente el tiempo de tratamiento y aumentar la tasa de eliminación de HAP con puntos de ebullición más altos.



**Tabla 4.** Efectividad de la remoción de hidrocarburos por las técnicas de haz de electrones y calentamiento por resistencia eléctrica en diferentes tipos de suelo

| Técnica                                 | Tipo de hidrocarburo | Tipo de suelo  | Porcentaje de remoción (%) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Energía utilizada (kW) | Duración del tratamiento (h) | Referencia                    |
|-----------------------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Haz de electrones                       | Procesado            | Arcilloso      | 95                         | 525              | 9,4         | 100                    | -                            | Lassalle <i>et al.</i> (2024) |
|                                         | Crudo                | Areno-limoso   | 75                         | 450              | 0,8-1,4     | -                      | 0,06                         | Lassalle <i>et al.</i> (2023) |
| Calentamiento por resistencia eléctrica | HAPs                 | Areno-limoso   | 99,99                      | 700              | -           | 6                      | 48                           | C. Kim <i>et al.</i> (2022)   |
|                                         |                      | Franco-arenoso | 82,33                      | 200              | -           | -                      | 8                            | Han <i>et al.</i> (2021)      |
|                                         |                      | -              | 70                         | 100              | 30          | -                      | 2,55                         | Yue <i>et al.</i> (2023)      |
|                                         |                      | -              | 40                         | 394-524          | -           | -                      | 1,5                          | Han <i>et al.</i> (2020)      |

### Extracción de vapores del suelo

La eficiencia de la técnica de extracción de vapor del suelo para la remoción de hidrocarburos está influenciada por varios factores. La volatilidad de los contaminantes es crucial, ya que los compuestos más volátiles son más fácilmente removidos mediante este método (Cao *et al.*, 2021). La permeabilidad del suelo también juega un papel significativo; suelos más permeables, como los arenosos, permiten un mejor flujo de aire y, por ende, una mayor eficiencia en la extracción de vapores (Ding *et al.*, 2022). Además, la humedad del suelo puede afectar la eficiencia de esta técnica, ya que suelos demasiado húmedos pueden reducir la volatilidad de los hidrocarburos y dificultar el flujo de aire (Oubre *et al.*, 2023). La temperatura del suelo es otro factor importante, ya que un incremento en la temperatura puede aumentar la volatilidad de los contaminantes, al mejorar la eficiencia del proceso (Xue *et al.*, 2023). La heterogeneidad del suelo y la presencia de materiales impermeables pueden crear zonas donde los contaminantes queden atrapados, al dificultar su remoción (Hoag *et al.*, 2023). Asimismo, la duración del tratamiento y el diseño del sistema, así como la ubicación y la cantidad de pozos de extracción, también afectan la eficacia de la técnica (Liu *et al.*, 2024).

En la investigación realizada por Yue *et al.* (2023), se aplicó la técnica de extracción de vapor del suelo de textura franca, contaminado con un hidrocarburo aromático policíclico. El suelo fue expuesto a una temperatura de 100 °C-110 °C por un periodo de tratamiento de 18 horas. Al final del tratamiento se logró remover el 99 % del HAP. Esto demuestra la gran efectividad de esta técnica para remover este tipo de contaminante en suelos de tipo franco. Asimismo, la investigación realizada por Yu *et al.* (2019) logró remover el 93,4 % del hidrocarburo, en este caso crudo. Se utilizó una temperatura de 210 °C y el tiempo de duración del tratamiento se incrementó a 30,8 horas. Esto indica que se debe aumentar la temperatura del tratamiento para tratar suelos de textura limosa, y que también influye el tipo de contaminante.

En ese mismo sentido, Yu *et al.* (2024) trabajaron igualmente con un suelo limoso contaminado con un hidrocarburo crudo y aplicaron la misma temperatura de 210 °C para el tratamiento. Sin embargo, el tiempo de tratamiento se aumentó a 54 horas y se logró una remoción del 90 % del contaminante. Por otro lado, la investigación realizada por Zhang *et al.* (2023), a pesar de trabajar con un suelo de contextura limosa contaminado con un hidrocarburo crudo, utilizó una temperatura de 20 °C y un tiempo de tratamiento menor, al durar solamente 2 horas. A pesar de disminuir la temperatura y el tiempo, lograron una remoción del 90 % del hidrocarburo crudo. Esto puede deberse a que la humedad del suelo tratado era cero. Albergaria *et al.* (2012) trabajaron con un suelo de contextura arenosa contaminado con un hidrocarburo procesado. Para aplicar el tratamiento, se utilizó una temperatura de 200 °C y se logró un porcentaje de remoción de 92 %. Shi *et al.* (2020) también trabajaron con un suelo de contextura arenosa contaminado con un hidrocarburo procesado. El tratamiento tuvo una duración de 8 horas y logró un porcentaje de remoción de 90 %.

Finalmente, Liang y Yang (2021) llevaron a cabo un estudio utilizando un suelo de textura arenosa contaminado con hidrocarburos crudos, usando el tratamiento de extracción de vapor del suelo aplicado durante 12 horas, y alcanzaron un porcentaje de remoción del 53 %. Por otro lado, Juanxiang *et al.* (2021) trabajaron con un suelo de textura arenoso-arcilloso igualmente contaminado con hidrocarburos crudos. En este caso, emplearon un tratamiento de dos horas a una temperatura constante de 20 °C, y obtuvieron una remoción del 90 %.

### Ventajas y limitaciones de las técnicas analizadas según tipo de suelo

Esta investigación, basada en los datos presentados en las tablas 1, 2, 3 y 4, muestra que algunas técnicas son más efectivas en suelos arcillosos, mientras que otras funcionan lo hacen mejor en suelos limosos o arenosos (tabla 5). Además, se especifica el tipo de hidrocarburo en el que se obtienen mejores resultados.



**Tabla 5.** Ventajas y limitaciones de las técnicas analizadas

| Técnica                                 | Ventajas                                                                                                           | Limitaciones                                                                     |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Calentamiento por resistencia eléctrica | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos y HAP en suelos arenoso limoso y franco-arenoso         | Menor rendimiento en suelo arcilloso                                             |
| Desorción térmica                       | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos y procesado en suelos francos, arenoso, respectivamente | Menor rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos en suelo arcilloso   |
| Electrocinética                         | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos y HAP en suelos arenoso y limoso, respectivamente       | Menor rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos HAP en suelo franco-arenoso |
| Haz de electrones                       | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos procesados en suelo arcilloso                                  | Menor rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos procesado en suelo arenoso  |
| Radiación de microondas                 | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos y HAP en suelos arenosos y areno-limoso respectivamente | Menor rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos en suelo limoso      |
| Extracción de vapores del suelo         | Alto rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos y HAP en suelos franco y limoso, respectivamente        | Menor rendimiento en el tratamiento de hidrocarburos crudos en suelo arenoso     |

Las expresiones «alto rendimiento» y «menor rendimiento» se refieren a los porcentajes de remediación obtenidos en los ensayos revisados en la literatura científica. En el primer caso, se alcanzaron valores iguales o superiores al 90 %, mientras que, en el segundo caso, los resultados fueron inferiores. No obstante, es importante destacar que la eficiencia o rendimiento no solo depende del tipo de hidrocarburo o de la técnica aplicada, sino también de factores como la humedad, la temperatura, la energía utilizada y otros, dependiendo de cada estudio.

## Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos usando técnicas térmicas cuentan con un alto porcentaje de remoción de contaminantes orgánicos del suelo. Cada técnica presenta ventajas y consideraciones específicas que atribuyen a su eficacia, como la temperatura usada, el tipo de suelo tratado, la presencia de humedad y la polaridad de los contaminantes. Es necesario evaluar cada una de estas variables si se desea implementar una de estas técnicas *in situ*. Los trabajos de laboratorio analizados en esta investigación muestran resultados promisorios.

La desorción térmica destaca por su capacidad para eliminar eficazmente los contaminantes, al lograr altos porcentajes de remoción, especialmente en suelo arenoso y franco. Sin embargo, es recomendable considerar la polaridad de los contaminantes, ya que esta puede influir en la eficacia del proceso de remoción. Por otro lado, el haz de electrones, utilizando electrones de alta energía, logra tasas de remoción de hasta el 95 % para hidrocarburos, especialmente en suelos arcillosos con condiciones óptimas de temperatura y humedad.

El calentamiento por resistencia eléctrica alcanza una eficiencia de remoción del 99,99 % en suelos arenosos limosos, lo que revela ser una técnica eficaz para la desorción y volatilización de contaminantes. Cabe mencionar que la técnica de electrocinética se muestra como una solución bastante prometedora y flexible para la remediación de suelos contaminados, tanto *in situ* como *ex situ*. Su éxito depende en mayor medida de la textura y humedad del suelo, y es capaz de remediar hasta el 98 % de crudo de petróleo. En cuanto a la radiación por microondas, se destaca su eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles, aunque la presencia de humedad en el suelo puede influir en su eficacia, por lo que es crucial controlar este factor para garantizar resultados óptimos.

Por último, la técnica de extracción de vapor del suelo depende en su totalidad de la volatilidad del contaminante, la permeabilidad del suelo, la humedad y la temperatura. Necesita condiciones muy específicas para llegar al mayor porcentaje de remoción. Estos métodos presentan ventajas significativas en términos de eficiencia energética y tiempo de tratamiento. Se subraya su relevancia en la remediación de suelos contaminados.

En general, las técnicas de remediación térmica ofrecen alternativas efectivas para la eliminación de hidrocarburos en suelos contaminados. Sin embargo, es crucial analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado para seleccionar la técnica adecuada y los parámetros de tratamiento. Controlar la humedad y la temperatura es esencial para lograr resultados óptimos en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. A pesar de su eficacia que se ha encontrado en los artículos, se requiere más investigación para optimizar estos procesos y llevarlos a trabajos de remediación en campo *in situ*.

Los autores revisados afirman que, dado que la presencia de agua puede afectar la eficiencia del proceso de remoción de contaminantes, se debe analizar y controlar la humedad en el suelo durante los tratamientos. Para la remediación térmica recomiendan considerar la polaridad de los contaminantes, ya que esta puede influir en la eficiencia de la remoción. Asimismo, antes de emplear una técnica de remediación, es importante analizar el suelo contaminado para conocer sus propiedades fisicoquímicas y así elegir la técnica con los parámetros de tratamiento más eficiente.

Un buen punto de partida para desarrollar proyectos de remediación es conocer el contaminante, el tipo de suelo y su humedad.

### **Contribución de autoría**

DO: conceptualización y redacción del borrador original

DR: redacción del borrador original

KP: metodología y redacción del borrador original

MS: redacción del borrador original

YV-O: conceptualización, supervisión y redacción del borrador original

### **Fuente de financiamiento**

Autofinanciado.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

### **Agradecimientos**

Agradecimiento especial a la profesora Cristina Amiel y a los alumnos del décimo ciclo de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, que colaboraron en la identificación y selección de los artículos científicos: Emely Condori, Janina Coripuna, Azucena Huamaní, Salvador Inzua, Isbeth Luyo, Sandra Maguiña, Jimena Morales y Kimberly Ñahuin.

## Referencias bibliográficas

- Abdelhafeez, I. A., El-Tohamy, S. A., Abd Ul-Malik, M. A., Abdel-Raheem, S. A. A. y El-Dars, F. M. S. (2022). «A review on green remediation techniques for hydrocarbons and heavy metals contaminated soil». *Current Chemistry Letters*, 11(1), pp. 43-62. Disponible en: <https://doi.org/10.5267/j.CCL.2021.9.006>
- Abou-Shady, A. y Yu, W. (2023). «Recent advances in electrokinetic methods for soil remediation. A critical review of selected data for the period 2021-2022». *International Journal of Electrochemical Science*, 18(8), 100234. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.IJOES.2023.100234>
- Acosta-Santoyo, G., Solís, S., Hernández-Silva, G., Cárdenas, J., Plank, Z. y Bustos, E. (2019). «Analysis of the biological recovery of soils contaminated with hydrocarbons using an electrokinetic treatment». *Journal of Hazardous Materials*, 371, pp. 625-633. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.015>
- Adhami, S., Jamshidi-Zanjani, A. y Darban, A. K. (2021). «Phenanthrene removal from the contaminated soil using the electrokinetic-Fenton method and persulfate as an oxidizing agent». *Chemosphere*, 266, 128988. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128988>
- Albergaria, J. T., Alvim-Ferraz, M. da C. M. y Delerue-Matos, C. (2012). «Remediation of sandy soils contaminated with hydrocarbons and halogenated hydrocarbons by soil vapour extraction». *Journal of Environmental Management*, 104, pp. 195-201. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.033>
- Alcántara, M. T., Gómez, J., Pazos, M. y Sanromán, M. A. (2012). «Electrokinetic remediation of lead and phenanthrene polluted soils». *Geoderma*, 173-174, pp. 128-133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.009>
- Ana Rita, F., Guedes, P., Mateus, E. P., Jensen, P. E., Ribeiro, A. B. y Couto, N. (2021). «Hydrocarbon-contaminated soil in cold climate conditions: Electrokinetic-bioremediation technology as a remediation strategy». En: A. B. Ribeiro y M. N. Vara Prasad (eds.). *Electrokinetic Remediation for Environmental Security and Sustainability* (pp. 173-190). Nueva Jersey: Wiley. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781119670186.CH8>
- Apul, O. G., Delgado, A. G., Kidd, J., Alam, F., Dahlen, P. y Westerhoff, P. (2016). «Carbonaceous nano-additives augment microwave-enabled thermal remediation of soils containing petroleum hydrocarbons». *Environmental Science: Nano*, 3(5), pp. 997-1002. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6EN00261G>
- Arumugam, A., Fang, C., Selvin, J., Kuppusamy, S., Ricky Devi, O., Zhang, F., Guo, X., Kadaikunnan, S., Balu, R. y Liu, X. (2024). «Plant biomass extracted eco-friendly natural surfactant enhanced bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil». *Environmental Research*, 245, 117913. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117913>
- Asadollahfardi, G. y Rezaee, M. (2019). «Electrokinetic remediation of diesel-contaminated silty sand under continuous and periodic voltage application». *Environmental Engineering Research*, 24(3), pp. 456-462. Disponible en: <https://doi.org/10.4491/EER.2018.301>
- Bocos, E., Fernandez-Costas, C., Pazos, M. y Sanroman, M. A. (2015). «Removal of PAHs and pesticides from polluted soils by enhanced electrokinetic-Fenton treatment». *Chemosphere*, 125, pp. 168-174. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.049>
- Brown, K. E., Wasley, J. y King, C. K. (2022). «Effects of ageing on toxicity of diesel contaminated soil to Antarctic nematodes: Implications 2 for risk assessment of Antarctic soils». Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=4058990>
- Bykova, M. V., Alekseenko, A. V., Pashkevich, M. A. y Drebenstedt, C. (2021). «Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes». *Environmental Geochemistry and Health*, 43(6), 2331-2346. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-020-00802-0>
- Cao, W., Zhang, L., Miao, Y. y Qiu, L. (2021). «Research progress in the enhancement technology of soil vapor extraction of volatile petroleum hydrocarbon pollutants». *Environmental Science: Processes & Impacts*, 23(11), pp. 1650-1662. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/D1EM00170A>
- Carranza, C. y van der Ploeg, M. (2020). «Predicting and forecasting root zone soil moisture with Random Forests». ESS Open Archive. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/essoar.10502156.1>
- Chen, H., Cao, Y., Qin, W., Lin, K., Yang, Y., Liu, C. y Ji, H. (2024). «Machine learning models for predicting thermal desorption remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons». *Science of The Total Environment*, 927, 172173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172173>
- Chien, Y. C. (2012). «Field study of in situ remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil on site using microwave energy». *Journal of Hazardous Materials*, 199-200, pp. 457-461. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.012>
- Cho, K., Myung, E., Kim, H., Purev, O., Park, C. y Choi, N. (2020). «Removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil through microwave irradiation». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), pp. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph17165952>
- Chu, L., Cang, L., Sun, Z., Wang, X., Fang, G. y Gao, J. (2022). «Reagent-free electrokinetic remediation coupled with anode oxidation for the treatment of phenanthrene polluted soil». *Journal of Hazardous Materials*, 433, 128724. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128724>
- Costanza, J., Marcet, T., Cápiro, N. L. y Pennell, K. D. (2017). «Tetrachloroethene Release and Degradation During Combined ERH and Sodium Persulfate Oxidation». *Groundwater Monitoring & Remediation*, 37(4), pp. 43-50. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/GWMR.12251>
- Couling, N. R., Towell, M. G. y Semple, K. T. (2010). «Biodegradation of PAHs in soil: Influence of chemical structure, concentration and multiple amendment». *Environmental Pollution*, 158(11), pp. 3411-3420. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.07.034>
- Crognale, S., Cocarta, D. M., Streche, C. y D'Annibale, A. (2020). «Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils». *New Biotechnology*, 58, pp. 38-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.04.002>
- Cuevas, O., Herrada, R. A., Corona, J. L., Olvera, M. G., Sepúlveda-Guzmán, S., Sirés, I. y Bustos, E. (2016). «Assessment of IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ti electrodes for the electrokinetic treatment of hydrocarbon-contaminated soil using different electrode arrays». *Electrochimica Acta*, 208, pp. 282-287. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.05.045>
- Dadkhah, A. A. y Akgerman, A. (2002). «Hot water extraction with in situ wet oxidation: PAHs removal from soil». *Journal of Hazardous Materials*, 93(3), pp. 307-320. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00048-1)

- Deng, J., Wang, H., Su, Y., Shen, K., Chen, X., Zhou, X., Hu, X. y Gao, Y. (2024). «Quantifying the roles of thermal volatilization and decomposition in microwave remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-polluted soil and modeling remediation effectiveness». *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132884. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132884>
- Ding, Y., Zhang, Y., Deng, Z., Song, H., Wang, J. y Guo, H. (2022). «An innovative method for soil vapor extraction to improve extraction and tail gas treatment efficiency». *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), pp. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08734-8>
- Effendi, A. J., Ramadan, B. S. y Helmy, Q. (2022). «Enhanced remediation of hydrocarbons contaminated soil using electrokinetic soil flushing – Landfarming processes». *Bioresource Technology Reports*, 17, 100959. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100959>
- Eldos, H. I., Ashfaq, M. Y. y Al-Ghouti, M. A. (2020). «Rapid assessment of the impact of microwave heating coupled with UV-C radiation on the degradation of PAHs from contaminated soil using FTIR and multivariate analysis». *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), pp. 7609-7625. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.08.031>
- Elijah, A. A. (2022). «A review of the petroleum hydrocarbons contamination of soil, water and air and the available remediation techniques, taking into consideration the sustainable development goals». *Earthline Journal of Chemical Sciences*, 7(1), pp. 97-113. Disponible en: <https://doi.org/10.34198/EJCS.7122.97113>
- Estabragh, A. R., Lahooori, M., Javadi, A. A. y Abdollahi, J. (2019). «Effect of a surfactant on enhancing efficiency of the electrokinetic method in removing anthracene from a clay soil». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103298>
- Falciglia, P. P., De Guidi, G., Catalfo, A. y Vagliasindi, F. G. A. (2016). «Remediation of soils contaminated with PAHs and nitro-PAHs using microwave irradiation». *Chemical Engineering Journal*, 296, pp. 162-172. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.099>
- Falciglia, P. P., De Guidi, G., Vento, F., Finocchiaro, G., Castro, E., Granetto, M., Tosco, T. y Vagliasindi, F. G. A. (2024). «Liquid activated carbon (LAC) – Enhanced microwave remediation of PAH - Contaminated soils». *Separation and Purification Technology*, 331, 125628. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.SEPPUR.2023.125628>
- Falciglia, P. P., Giustra, M. G. y Vagliasindi, F. G. A. (2011). «Soil texture affects adsorption capacity and removal efficiency of contaminants in ex situ remediation by thermal desorption of diesel-contaminated soils». *Chemistry and Ecology*, 27(suppl. 1), pp. 119-130. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.534087>
- Falciglia, P. P., Scandura, P. y Vagliasindi, F. G. A. (2017). «Modelling of in situ microwave heating of hydrocarbon-polluted soils: Influence of soil properties and operating conditions on electric field variation and temperature profiles». *Journal of Geochemical Exploration*, 174, pp. 91-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.005>
- Falciglia, P. P. y Vagliasindi, F. G. A. (2014). «Remediation of hydrocarbon-contaminated soils by ex situ microwave treatment: Technical, energy and economic considerations». *Environmental Technology (United Kingdom)*, 35(18), pp. 2280-2288. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.902109>
- Fang, W., Zhou, L., Li, Y., Li, H., Zhong, H. y Zha, Y. (2024). «Heat and mass transfer based on the low-temperature thermal treatment of hydrocarbons-impacted soil: A numerical simulation and sandbox validation». *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133999. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133999>
- Fardin, A. B., Jamshidi-Zanjani, A. y Darban, A. K. (2021). «Application of enhanced electrokinetic remediation by coupling surfactants for kerosene-contaminated soils: Effect of ionic and nonionic surfactants». *Journal of Environmental Management*, 277, 111422. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111422>
- Feiyue, G., Chuncai, Z., Zihao, W., Weiwei, Z., Xin, W. y Guijian, L. (2023). «Solid-oil separation of coal tar residue to reduce polycyclic aromatic hydrocarbons via microwave-assisted extraction». *Journal of Environmental Management*, 337, 117679. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117679>
- García-García, R., Bocanegra-García, V., Vital-López, L., García-Mena, J., Zamora-Antuñano, M. A., Cruz-Hernández, M. A., Rodríguez-Reséndiz, J. y Mendoza-Herrera, A. (2023). «Assessment of the microbial communities in soil contaminated with petroleum using next-generation sequencing tools». *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(12), 117679. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app13126922>
- George, C. E., Azwell, D. E., Adams, P. A., Rao, G. V. N. y Averett, D. E. (1995). «Evaluation of steam as a sweep gas in low temperature thermal desorption processes used for contaminated soil clean up». *Waste Management*, 15(5-6), pp. 407-416. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)80029-4](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)80029-4)
- Gidudu, B. y Chirwa, E. M. N. (2022). «The role of pH, electrodes, surfactants, and electrolytes in electrokinetic remediation of contaminated soil». *Molecules*, 27(21), 7381. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27217381>
- Han, Z., Jiao, W., Tian, Y., Jian, H. y Denglun, H. (2020). «Lab-scale removal of PAHs in contaminated soil using electrical resistance heating: Removal efficiency and alteration of soil properties». *Chemosphere*, 239, 124496. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124496>
- Han, Z., Li, S., Yue, Y., Tian, Y., Wang, S., Qin, Z., Ji, L., Han, D. y Jiao, W. (2021). «Enhancing remediation of PAH-contaminated soil through coupling electrical resistance heating using Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>». *Environmental Research*, 198, 110457. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110457>
- Hoag, G. E., Marley, M. C., Cliff, B. L. y Nangeroni, P. (2023). «Soil vapor extraction research developments». En: P. T. Kostecki y E. J. Calabrese (eds.), *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater* (pp. 187-202). Nueva York: Routledge. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9780203751572-18>
- Hosseini, A., Saberi, M. H. y ZareNezhad, B. (2022). «Significance of petroleum seepages in hydrocarbon exploration-case study of Khourian Desert, Central Iran». *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(6), pp. 1649-1663. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01440-7>
- Hu, G., Liu, H., Chen, C., Hou, H., Li, J., Hewage, K. y Sadiq, R. (2021). «Low-temperature thermal desorption and secure landfill for oil-based drill cuttings management: Pollution control, human health risk, and probabilistic cost assessment». *Journal of Hazardous Materials*, 410, 124570. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124570>
- Huang, H., Tang, J., Niu, Z. y Giesy, J. P. (2019). «Interactions between electrokinetics and rhizoremediation on the remediation of crude oil-contaminated soil». *Chemosphere*, 229, pp. 418-425. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.150>
- Ji, W., Parameswarappa Jayalakshamma, M., Abou Khalil, C., Zhao, L. y Boufadel, M. (2020). «Removal of hydrocarbon from soils possessing macro-heterogeneities using electrokinetics and surfactants». *Chemical Engineering Journal Advances*, 4, 100030. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100030>





- Johnson, P., Trybala, A., Starov, V. y Pinfield, V. J. (2021). «Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants». *Advances in Colloid and Interface Science*, 288, 102340. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102340>
- Kan, H., Wu, D., Wang, T., Qu, G., Zhang, P., Jia, H. y Sun, H. (2021). «Crystallographic manganese oxides enhanced pyrene contaminated soil remediation in microwave activated persulfate system». *Chemical Engineering Journal*, 417, 127916. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127916>
- Kariyawasam, T., Doran, G. S., Howitt, J. A. y Prenzler, P. D. (2023). «Optimization and comparison of microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction, and eucalyptus oil-assisted extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil and sediment». *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(5), pp. 982-994. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/etc.5593>
- Kastanek, F., Topka, P., Soukup, K., Maletkova, Y., Demnerova, K., Kastanek, P. y Solcova, O. (2016). «Remediation of contaminated soils by thermal desorption; effect of benzoyl peroxide addition». *Journal of Cleaner Production*, 125, pp. 309-313. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.134>
- Kim, C., Koh, T., Lee, D. y Park, D. (2022). «Assessment of heavy metal and oil-contaminated silty sand treatment by electrical resistance heating method». *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(9), 4630. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app12094630>
- Kim, S., Lee, C. G., Kim, Y. T., Kim, K. H. y Lee, J. (2020). «Effect of Pt catalyst on the condensable hydrocarbon content generated via food waste pyrolysis». *Chemosphere*, 248, 126043. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126043>
- Krouzek, J., Durdak, V., Hendrych, J., Masin, P., Sobek, J. y Spacek, P. (2018). «Pilot scale applications of microwave heating for soil remediation». *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 130, pp. 53-60. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.010>
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R. y Megharaj, M. (2017). «Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions». *Chemosphere*, 168, pp. 944-968. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>
- Lafaille, R., Bozkurt, Y. C., Pruitt, E., Lewis, J., Bernier, R., Kong, D., Westerhoff, P., Dahlen, P. y Apul, O. (2021). «Repeatable use assessment of silicon carbide as permanent susceptor bed in *ex situ* microwave remediation of petroleum-impacted soils». *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100116>
- Lassalle, J., Briggs, K. W., Thompson, T. N., Strzelec, A., Hoelen, T. P., Kong, D., Bireta, P., Sabadell, G. P. y Staack, D. (2023). «Electron beam remediation of soils impacted with heavy hydrocarbons». *Journal of Hazardous Materials Advances*, 11, 100335. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.HAZADV.2023.100335>
- Lassalle, J., Hoelen, T. P., Bireta, P., Kong, D., Sabadell, G. P. y Staack, D. (2024). «Demonstration of a scalable process for remediation of petroleum-impacted soil using electron beam irradiation». *Environmental Pollution*, 342, 122893. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122893>
- Lee, Y., Lee, Y. y Jeon, C. O. (2019). «Biodegradation of naphthalene, BTEX, and aliphatic hydrocarbons by Paraburkholderia aromaticivorans BN5 isolated from petroleum-contaminated soil». *Scientific Reports*, 9(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36165-x>
- Li, F., Guo, S. y Hartog, N. (2012). «Electrokinetics-enhanced biodegradation of heavy polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around iron and steel industries». *Electrochimica Acta*, 85, pp. 228-234. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.08.055>
- Li, F., Zhang, Y., Wang, S., Li, G., Yue, X., Zhong, D., Chen, C. y Shen, K. (2020). «Insight into ex-situ thermal desorption of soils contaminated with petroleum via carbon number-based fraction approach». *Chemical Engineering Journal*, 385, 123946. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.CEJ.2019.123946>
- Li, Y. T., Wang, Y. Q., Li, X., Liu, X. Y., Liu, H., Sui, Q. y Du, W. Y. (2024). «Remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils by nZVI coupled with electrokinetic activation of persulfate». *Journal of Cleaner Production*, 459, 142514. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142514>
- Li, Y., Wei, M., Yu, B., Liu, L. y Xue, Q. (2022). «Thermal desorption optimization for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils by a self-built sustainability evaluation tool». *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129156. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129156>
- Liang, C. y Yang, S. Y. (2021). «Foam flushing with soil vapor extraction for enhanced treatment of diesel contaminated soils in a one-dimensional column». *Chemosphere*, 285. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131471>
- Lingamdinne, L. P., Kulkarni, R., Choi, Y. L., Pal, C. A., Momin, Z. H., Won, S. J., Koduru, J. R. y Chang, Y. Y. (2024). «Analyzing atmospheric plasma's potential for diesel soil remediation: Insightful mechanisms». *Chemosphere*, 362, 142586. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142586>
- Liu, Y., Huang, F., Zhou, D., Wang, T. y Wang, G. (2024). «Study of factors affecting the remediation of contaminated soil through pneumatic fracturing and soil vapor extraction». *Journal of Hazardous Materials*, 467, 133776. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133776>
- Liu, Z., Zhang, Y., Yang, S., Yang, J., Zhang, T., Sun, Z. y Wang, L. (2023). «Surfactant-enhanced anoxic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in aged subsurface soil at high temperature (60 °C)». *Environmental Research*, 237, 116884. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ENVRES.2023.116884>
- Luo, F., Tan, H., Shu, X., Miao, Y., Chen, S., Yuan, B., Wang, L., Xie, Y. y Lu, X. (2020). «Rapidly immobilization of simulated An3+ radioactive contaminated soil as glass-ceramics by microwave sintering». [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-86505/V1>
- Luo, H., Wang, H., Kong, L., Li, S. y Sun, Y. (2019). «Insights into oil recovery, soil rehabilitation and low temperature behaviors of microwave-assisted petroleum-contaminated soil remediation». *Journal of Hazardous Materials*, 377, pp. 341-348. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.092>
- Luter, H. M., Whalan, S., Andreakis, N., Abdul Wahab, M., Botté, E. S., Negri, A. P. y Webster, N. S. (2019). «The effects of crude oil and dispersant on the larval sponge holobiont». *MSystems*, 4(6). Disponible en: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/msystems.00743-19>
- Martin, E. J. y Kueper, B. H. (2011). «Observation of trapped gas during electrical resistance heating of trichloroethylene under passive venting conditions». *Journal of Contaminant Hydrology*, 126(3-4), pp. 291-300. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.JCONHYD.2011.09.004>
- Martínez-Hidalgo, P., Maymon, M., Pule-Meulenberg, F. y Hirsch, A. M. (2019). «Engineering root microbiomes for healthier crops and soils using beneficial, environmentally safe bacteria». *Canadian Journal of Microbiology*, 65(2), pp. 91-104. Disponible en: <https://doi.org/10.1139/cjm-2018-0315>

- Martínez-Prado, A., Pérez-López, M. E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A. y Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). «Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), pp. 241-252. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020226009>
- Mena, E., Villaseñor, J., Rodrigo, M. A. y Cañizares, P. (2016). «Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: Effect of periodic polarity reversal and voltage gradient». *Chemical Engineering Journal*, 299, pp. 30-36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.049>
- Nguyen, V. H., Phan Thi, L. A., Van Le, Q., Singh, P., Raizada, P. y Kajitvichyanukul, P. (2020). «Tailored photocatalysts and revealed reaction pathways for photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water, soil and other sources». *Chemosphere*, 260, 127529. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127529>
- Niqui-Arroyo, J. y Ortega-Calvo, J. (2010). «Effect of electrokinetics on the bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in polluted soils». *Journal of Environmental Quality*, 39(6), pp. 1993-1998. Disponible en: <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0101>
- O'Brien, P. L., DeSutter, T. M., Casey, F. X. M., Khan, E. y Wick, A. F. (2018). «Thermal remediation alters soil properties – a review». *Journal of Environmental Management*, 206, pp. 826-835. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.052>
- Parameswarappa Jayalakshamma, M., Ji, W., Khalil, C. A., Marhaba, T. F., Abrams, S., Lee, K., Zhang, H. y Boufadel, M. (2021). «Removal of hydrocarbons from heterogenous soil using electrokinetics and surfactants». *Environmental Challenges*, 4, 100071. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100071>
- Perez, F. y Devegowda, D. (2021). «Hydrocarbon self-diffusion and assessing the validity of Graham's Law under nanoporous confinement in shales». *Energy and Fuels*, 35(13), pp. 10512-10518. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00735>
- Popescu, M., Rosales, E., Sandu, C., Meijide, J., Pazos, M., Lazar, G. y Sanromán, M. A. (2017). «Soil flushing and simultaneous degradation of organic pollutants in soils by electrokinetic-Fenton treatment». *Process Safety and Environmental Protection*, 108, pp. 99-107. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.012>
- Ramírez, E. M., Camacho, J. V., Rodrigo, M. A. y Cañizares, P. (2015). «Combination of bioremediation and electrokinetics for the in-situ treatment of diesel polluted soil: A comparison of strategies». *Science of The Total Environment*, 533, pp. 307-316. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.127>
- Ramírez, E. M., Jiménez, C. S., Camacho, J. V., Rodrigo, M. A. R. y Cañizares, P. (2015). «Feasibility of coupling permeable bio-barriers and electrokinetics for the treatment of diesel hydrocarbons polluted soils». *Electrochimica Acta*, 181, pp. 192-199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.201>
- Reddy, B. R. y Vinu, R. (2021). «Evidence of interactions in microwave-assisted co-pyrolysis of different varieties of coals». *Journal of the Energy Institute*, 95, pp. 18-29. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.11.006>
- Robinson, J. P., Kingman, S. W., Lester, E. H. y Yi, C. (2012). «Microwave remediation of hydrocarbon-contaminated soils - Scale-up using batch reactors». *Separation and Purification Technology*, 96, pp. 12-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.05.020>
- Saberi, N., Aghababaei, M., Ostovar, M. y Mehrnahad, H. (2018). «Simultaneous removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and heavy metals from an artificial clayey soil by enhanced electrokinetic method». *Journal of Environmental Management*, 217, pp. 897-905. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.125>
- Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C. y Naidu, R. (2021). «Electrokinetic remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil (I)». *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101585. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101585>
- Sánchez Mata, O., Aguilera Flores, M. M., Ureño García, B. G., Ávila Vázquez, V., Cabañas García, E. y Franco Villegas, E. A. (2023). «Bioremediation of automotive residual oil-contaminated soils by biostimulation with enzymes, surfactant, and vermicompost». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(16), 6600. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph20166600>
- Sandu, C., Popescu, M., Rosales, E., Bocos, E., Pazos, M., Lazar, G. y Sanromán, M. A. (2016). «Electrokinetic-Fenton technology for the remediation of hydrocarbons historically polluted sites». *Chemosphere*, 156, pp. 347-356. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.133>
- Serrasolses, I., Romanyà, J. y Khanna, P. K. (2008). «Effects of heating and autoclaving on sorption and desorption of phosphorus in some forest soils». *Biology and Fertility of Soils*, 44(8), pp. 1063-1072. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-008-0301-7>
- Shentu, J., Chen, Q., Cui, Y., Wang, Y., Lu, L., Long, Y. y Zhu, M. (2023). «Disturbance and restoration of soil microbial communities after in-situ thermal desorption in a chlorinated hydrocarbon contaminated site». *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130870. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130870>
- Shi, J., Yang, Y., Li, J., Xi, B., Wang, Y., Wang, Y. y Tang, J. (2020). «A study of layered-unlayered extraction of benzene in soil by SVE». *Environmental Pollution*, 263, 114219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114219>
- Sivagami, K., Padmanabhan, K., Joy, A. C. y Nambi, I. M. (2019). «Microwave (MW) remediation of hydrocarbon contaminated soil using spent graphite – An approach for waste as a resource». *Journal of Environmental Management*, 230, pp. 151-158. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.071>
- Smith, D. N. I., Ortega-Camacho, D., Acosta-González, G., Leal-Bautista, R. M., Fox, W. E. y Cejudo, E. (2020). «A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer». *Heliyon*, 6(5), e03970. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03970>
- Surya, G., Shivam, T., Rajiv, S., Harsha, K. S., Debajyoti, P., Nand, T. S., Sekhar, S. I. y Kumar, D. S. (2022). «Setting up a new CZO in the Ganga basin: instrumentation, stakeholder engagement and preliminary observations». *Authorea Preprints*. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ESSOAR.BFE245C93CB55808.B3F3DF49A9514DCB.1>
- Tan, Z., Ai, P. y Wang, Q. (2017). «Recent developments in organic contaminated soil remediation with the use of thermal desorption technology». *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(5), pp. 1145-1154. Disponible en: <https://doi.org/10.30638/EEJ.2017.119>
- Taylor, O. D. S., Abdollahi, M. y Vahedifard, F. (2022). «Statistical distributions of wave velocities and elastic moduli in near-surface unsaturated soils». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157, 107247. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107247>
- Tian, W., Wu, H., Wu, L., Liu, C., Yue, C. y Zhou, J. (2022). «Enhanced microwave remediation of organic contaminated soil: a new way of utilization of bluecoke powder». *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), pp. 5451-5460. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03439-3>



- Usman, M., Faure, P., Ruby, C. y Hanna, K. (2012). «Remediation of PAH-contaminated soils by magnetite catalyzed Fenton-like oxidation». *Applied Catalysis B: Environmental*, 117-118, pp. 10-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.APCATB.2012.01.007>
- Vidonish, J. E., Alvarez, P. J. J. y Zygourakis, K. (2018). «Pyrolytic remediation of oil-contaminated soils: Reaction mechanisms, soil changes, and implications for treated soil fertility». *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57(10), pp. 3489-3500. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.7b04651>
- Wang, K., Damarla, H. R., Berman, I. C. y Staack, D. (2020). «High dose rate electron beam irradiation of heavy alkanes in a multi-phase flow system». *Fuel*, 274, 117695. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.FUEL.2020.117695>
- Wang, S., Cheng, F., Shao, Z., Wu, B. y Guo, S. (2023). «Effects of thermal desorption on ecotoxicological characteristics of heavy petroleum-contaminated soil». *Science of the Total Environment*, 857, 159405. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159405>
- Wen, D., Liu, H., Zhang, Y. y Fu, R. (2023). «Electrokinetically-delivered persulfate and pulsed direct current electric field induced transport, mixing and thermally activated in situ for remediation of PAHs contaminated soil». *Journal of Hazardous Materials*, 444, 130414. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130414>
- Williams-Clayson, A. M., Vane, C. H., Jones, M. D., Thomas, R., Taylor, C. y Beriro, D. J. (2024). «Dermal absorption of high molecular weight parent and alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons from manufactured gas plant soils using *in vitro* assessment». *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133858. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.JHAZMAT.2024.133858>
- Wu, D., Kan, H., Zhang, Y., Wang, T., Qu, G., Zhang, P., Jia, H. y Sun, H. (2022). «Pyrene contaminated soil remediation using microwave/magnetite activated persulfate oxidation». *Chemosphere*, 286. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131787>
- Wu, L., Wu, H., Qiu, S., Zhou, J., Liu, C., Yue, C. y Du, S. (2022). «Insights into removal efficiency and mechanism of microwave remediation of soils contaminated with polyaromatic hydrocarbons of low molecular weight assisted by bluecoke-based conditioner». *Chemosphere*, 301. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134647>
- Wu, L., Wu, H., Wen, Q., Zhou, J., Aljuwayie, A. M., Chia, P. W., Ye, G., Zhang, Q., Liew, R. K. y Lam, S. S. (2023). «Gas stripping coupled with in-situ oxidation assisted microwave remediation of contaminated soil for efficient removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)». *Chemical Engineering Journal*, 473. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145411>
- Xu, S., Guo, S., Wu, B., Li, F. y Li, T. (2014). «An assessment of the effectiveness and impact of electrokinetic remediation for pyrene-contaminated soil». *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26(11), pp. 2290-2297. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.014>
- Xue, Y., Chen, L., Xiang, L., Zhou, Y. y Wang, T. (2023). «Experimental investigation on electromagnetic induction thermal desorption for remediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil». *Journal of Environmental Management*, 328, 117200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.JENVMAN.2022.117200>
- Xue, Y., Liu, J., Zhou, Y., Wang, T. y Xiang, L. (2022). «Treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil by basic oxygen furnace slag activated persulfate oxidation in presence of electromagnetic induction heating». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107267. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.JECE.2022.107267>
- Xue, Z., Zuo, R., Ding, F., Wu, Z., Pan, M., Cai, W., Xu, Y. y Wang, J. (2022). «Microwave-induced steam distillation (MISD) remediation in petroleum hydrocarbon-contaminated sites: From process improvement to pilot application». *Environmental Pollution*, 313, 120059. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122012738?via%3Dihub>
- Yu, Y., Kang, W., Song, J., He, Z., Wang, J., Liu, Y. y Yan, Z. (2024). «The mechanism for remediation of low-permeable soil contaminated with petroleum hydrocarbons by thermally-enhanced soil vapor extraction combined with sand mixing». *International Journal of Environmental Research*, 18(5), pp. 1-11. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41742-024-00639-w>
- Yu, Y., Liu, L., Yang, C., Kang, W., Yan, Z., Zhu, Y., Wang, J. y Zhang, H. (2019). «Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction». *Chemosphere*, 236, 124319. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.CHEMOSPHERE.2019.07.050>
- Yuan, Y., Guo, S., Li, F., Wu, B., Yang, X. y Li, X. (2016). «Coupling electrokinetics with microbial biodegradation enhances the removal of cycloparaffinic hydrocarbons in soils». *Journal of Hazardous Materials*, 320, pp. 591-601. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.043>
- Yue, R., Chen, Z., Zhao, L., Song, X., Chen, C., Qi, J. y Mao, X. (2023). «Propylene glycol-mixed steam enhanced extraction for an efficient and sustainable remediation of PAHs-contaminated soil». *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132029. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389423013122>
- Zaikin, Y. A. y Zaikina, R. F. (2016). «Upgrading and refining of crude oils and petroleum products by ionizing irradiation». *Topics in Current Chemistry*, 374(3). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/S41061-016-0035-1>
- Zeng, J., Wu, R., Peng, T., Li, Q., Wang, Q., Wu, Y., Song, X. y Lin, X. (2023). «Low-temperature thermally enhanced bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil: Effects on fate, toxicity and bacterial communities». *Environmental Pollution*, 335, 122247. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ENVPOL.2023.122247>
- Zhang, M., Chen, W., Chuan, X., Guo, X., Shen, X., Zhang, H., Wu, F., Hu, J., Wu, Z. y Wang, X. (2024). «Remediation of heavily PAHs-contaminated soil with high mineral content from a coking plant using surfactant-enhanced soil washing». *Science of The Total Environment*, 909, 168499. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2023.168499>
- Zhang, M., Wu, B., Guo, P., Wang, S. y Guo, S. (2021). «Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil under the superimposed electric field condition». *Chemosphere*, 273, 128723. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128723>
- Zhang, S., Liu, Z., Sun, R., Liu, W. y Chen, Y. (2023). «Orthogonal Experimental Study on Remediation of Ethylbenzene Contaminated Soil by SVE». *Sustainability (Switzerland)*, 15(2). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15021168>
- Zhang, S., Zhao, J. y Zhu, L. (2024). «New insights into thermal desorption remediation of pyrene-contaminated soil based on an optimized numerical model». *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132687. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.JHAZMAT.2023.132687>
- Zhou, Q., Zhang, D., Li, X., Qian, Z., Chen, G., Lyu, C., Ma, X. y Li, C. (2022). «Insight into the desorption behavior and mechanism of tight oil with in-situ low-temperature thermal». *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 218, 111001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2022.111001>

**Zivdar, Z., Heidarzadeh, N. y Asadollahfardi, G. (2019).** «Remediation of diesel-contaminated soil by low-temperature thermal desorption». *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), pp. 6113-6124. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-018-2020-4>