

Estado del arte de tecnologías de remediación de suelos contaminados por plomo: Revisión Sistemática 2014-2024

State of the art of lead-contaminated soil remediation technologies: Systematic Review 2014-2024

Jose Daniel Pariona Janapa¹, Nobelí Katherine Carreño Condori², Alejandro Jose Manayay Aranda², Leslie Laura Teodora Meza Hualparuca², Lily Denise Tello Peramás², Jazmin Milagros Roque Ponce² & Alexandra Sheyla Zapana Oro²

¹Docente principal del Departamento Académico de Suelos de la Facultad de Agronomía – UNALM

²Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Autor corresponsal:

Jose Daniel Pariona Janapa
20191181@lamolina.edu.pe

Citar como: Pariona Janampa, J. D., Tello Peramas, L. D., Roque Ponce, J. M., Carreño Condori, N. K., Manayay Aranda, A. J., Meza Hualparuca, L. L. T., & Zapana Oro, A. S. (2024). Estado del arte de tecnologías de remediación de suelos contaminados por plomo: Revisión Sistemática 2014-2024. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 7(1), 56-81
<https://doi.org/10.51343/racs.v7i1.1307>

Recibido: 27 de febrero 2024
Aceptado: 29 de setiembre 2024



© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribucion 4.0 Internacional (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

Resumen

El plomo (Pb), un metal pesado derivado principalmente de actividades antrópicas como la industria y la minería generando serios problemas ambientales y de salud al acumularse en el suelo. En el presente estudio se revisa sistemáticamente las tecnologías de remediación de suelos contaminados por plomo entre los años 2014 y 2024, empleando la metodología PRISMA. Se identificaron un total de 346 artículos relacionados, provenientes de la base de datos Scopus (335 registros) y Science Direct (11 registros adicionales) en ambos utilizando las palabras clave: “remediation” AND “lead-contaminated” AND “soil”. Tras aplicar los criterios de exclusión, se eliminaron 218 artículos por duplicados o falta de relevancia temática; quedando así con 128 artículos para una revisión detallada del cual se eliminaron artículos que no tenían acceso libre, no indicaban porcentaje de eficiencia, el tema central no era la remediación, no eran artículos de investigación y no estaban redactados en español ni en inglés. Finalmente, se obtuvieron 43 artículos de las dos bases de datos usadas. Los principales hallazgos destacan que el 53.5% de las investigaciones emplearon tecnología fisicoquímica, con una eficacia de remoción mayor al 80% y predominio de procesos ex situ. China presentó mayor número de publicaciones con 25. Y durante el periodo de estudio se apreció una disminución de estudios a partir del 2022.

Palabras clave: remediación, suelo, contaminación, plomo.

Abstract

Lead (Pb), a heavy metal derived mainly from anthropogenic activities such as industry and mining, generates serious environmental and health problems when it accumulates in the soil. In this study, the remediation technologies for lead-contaminated soils between 2014 and 2024 are systematically reviewed, using the PRISMA methodology. A total of 346 related articles were identified, from the Scopus database (335 records) and Science Direct (11 additional records) in both using the keywords: “remediation” AND “lead-contaminated” AND “soil”. After applying the exclusion criteria, 218 articles were eliminated due to duplicates or lack of thematic relevance; thus, 128 articles were left for a detailed review, from which articles that were not freely accessible, did not indicate efficiency percentage, the central theme was not remediation, were not research articles and were not written in Spanish or English were eliminated. Finally, 43 articles were obtained from the two databases used. The main findings highlight that 53.5% of the research used physicochemical technology, with a removal efficiency greater than 80% and predominance of ex situ processes. China had the highest number of publications with 25. And during the study period, a decrease in studies was observed starting in 2022.

Keywords: Remediation, soil, lead-contaminated

Introducción

La contaminación de suelos por metales pesados se ha vuelto uno de los mayores problemas, atrayendo la atención de todo el mundo debido a su toxicidad y los problemas potenciales que ello conlleva, como la amenaza a los ecosistemas, a la producción de alimentos y a la salud pública. Numerosos contaminantes de metales pesados se han vertido al suelo de diversas formas, como el consumo de combustibles fósiles, las industrias electrónicas, la minería, la fundición, la eliminación de residuos, uso de agroquímicos y riego (Qiu et al., 2021); siendo uno de ellos el plomo.

El plomo (Pb) es uno de los elementos tóxicos más abundantes y distribuidos ubicuamente en el suelo sin función biológica (Kushwaha et al., 2018). De acuerdo con Sarmiento & Flores (2021), la distribución de Pb en el suelo depende de sus propiedades, como textura, materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, tipo de arcilla y porosidad; además, depende de las cualidades de compuestos que contienen Pb. El Pb^{2+} se deriva principalmente de actividades de producción industrial, minera, agrícola y de otro tipo, como baterías, galvanoplastia, pigmentos, caucho, pesticidas, combustible, pintura, vidrio con plomo, etc., ingresa al suelo a través del riego de aguas residuales y escorrentía superficial y representa una grave amenaza para la calidad ambiental del suelo

y la salud humana (Liu et al., 2020).

Ante esa problemática es necesario encontrar una estrategia eficaz que además de remediar la contaminación del suelo, también mejore su calidad. En las últimas décadas se han desarrollado varias tecnologías de remediación, como la remediación física, la remediación química, la biorremediación y la reparación combinada, que podrían aplicarse a la remediación de suelos contaminados con plomo (Xiao et al., 2022). Sin embargo, a pesar de la existencia de estas tecnologías, se continúa realizando investigación orientada a mejorar la eficiencia de las ya existentes, así como el desarrollo de técnicas innovadoras, por lo cual muchas de ellas se encuentran en etapa de investigación para determinar su factibilidad técnica y económica (De la Rosa et al., 2007)

Por lo tanto, el objetivo de esta revisión sistemática, enfocado en la remediación de suelos contaminados por plomo, es resumir y analizar (1) los diferentes tipos de tecnologías empleadas, (2) el lugar de realización del proceso de remediación, (3) la eficiencia de remoción del plomo, (4) los países donde se realizaron las investigaciones y (5) la evolución de los estudios desde 2014 hasta 2024.

Material y Métodos

Dentro de la variedad de revisiones existentes, se aplicó la revisión sistemática, específicamente la metodología empleada fue PRISMA, la cual cumple con las directrices señaladas por Moher (2015) en *Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement*, los cuales son: detallar las preguntas de investigación (Tabla 1), realizar la búsqueda de artículos a través de la base de datos *Scopus*, en la cual se identificaron 225 artículos relacionados con la remediación de suelos contaminados por plomo publicados entre 2014 y 2024; complementar la búsqueda con 11 registros adicionales provenientes de la base de datos *Science Direct*, seleccionados bajo los mismos criterios para ampliar la cobertura temática; aplicar los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 2), proceso que permitió reducir el número de registros a 128 artículos relevantes; extraer información acorde a las preguntas de investigación inicialmente planteadas, y finalmente la redacción del artículo, con un total de 43 estudios incluidos en la revisión sistemática tras cumplir con los criterios establecidos.

Tabla 1*Preguntas de investigación*

RQ1	¿Cuáles son los tipos de tecnología empleados para la remediación de suelos contaminados por plomo?
RQ2	¿Cuáles son los lugares de remediación de suelos contaminados por plomo?
RQ3	¿Cuáles son las eficiencias de remoción de plomo en suelos contaminados?
RQ4	¿Cuáles son los países que han realizado estudios sobre la remediación de suelos contaminados por plomo?
RQ5	¿Existe un incremento de publicaciones de artículos sobre la remediación de suelos contaminados por plomo?

Con RQ1 se identificaron las diversas tecnologías empleadas para la remediación de suelos contaminados por plomo, estas se clasificaron de acuerdo con lo mencionado por Volke y Velasco (2002) en su libro “Tecnologías de remediación para suelos contaminados”; en las cuales son clasificados como: tratamiento biológico, fisicoquímico y térmico. Con RQ2 se obtuvo la información de si la remediación se dio en el mismo lugar de contaminación (in situ) o fue llevada a cabo en laboratorio (ex situ), esta clasificación también se detalló en el libro mencionado. Con RQ3 se conocieron los porcentajes de eficiencia en la remoción de plomo de los suelos contaminados. Con RQ4 se identificaron los países que han publicado estudios sobre la remediación de suelos contaminados con plomo a nivel mundial. Finalmente, con RQ5 se determinó si existe un incremento en las publicaciones de artículos con el tema central de remediación de plomo en suelos contaminados.

Tabla 2*Criterios de inclusión y exclusión utilizados para la revisión sistemática*

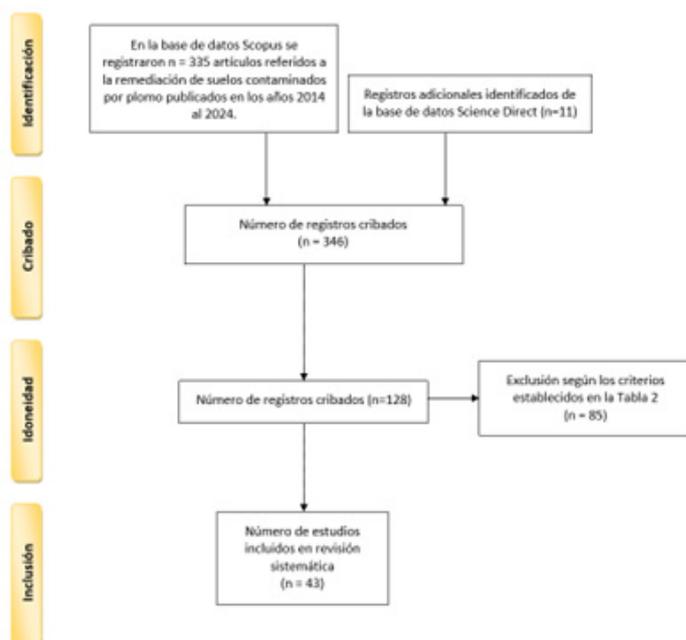
Criterios de Inclusión (CI)		Criterios de Exclusión (CE)	
CI1	Artículos publicados desde el 2014 hasta 2024	CE1	Artículos publicados antes del 2014
CI2	Artículos experimentales	CE2	Artículos de revisión y conferencias
CI3	Artículos en idioma español o inglés	CE3	Artículos que no estén escritos en español o inglés
CI4	Artículos con tema central la remediación de plomo en suelos	CE4	Artículos que no abordan primordialmente a la remediación de plomo en suelos
CI5	Artículos con acceso libre	CE5	Artículos que no sean de acceso libre
		CE6	Artículos que no brinden datos de eficiencia en la remoción de plomo

Para cumplir con los objetivos propuestos, se trabajó con las palabras claves *remediation AND lead-contaminated AND soil* en la base de datos *Scopus*, con la intención de obtener artículos publicados en el lapso del 2014 al 2024. Específicamente se buscaron artículos de investigación y no de revisiones; además fue de importancia evaluar que dichos trabajos tengan como tema central la remediación de suelos por contaminación exclusivamente de plomo y que brindaran resultados de la eficiencia de la tecnología aplicada en la remoción de dicho metal pesado.

Se presenta un diagrama, Figura 1, donde se ejemplifica el proceso de búsqueda, filtración y obtención de artículos a revisar.

Figura 1

Proceso de aplicación de metodología PRISMA



Dentro de los artículos omitidos para la revisión sistemática se encuentran aquellos que no tenían acceso libre (n=15), no indicaron porcentaje de eficiencia (n=10), el tema central no era la remediación (n= 29), no eran artículos de investigación sino revisión (n=11), no estaban redactados en inglés o español (n=20).

Resultados

Primera Pregunta de Investigación: Tipos de Tecnología Empleados para la Remediación de Suelos Contaminados por Plomo

Para la presente revisión sistemática es necesario conocer el tipo de tecnología empleado para la remediación de suelos contaminados por plomo, en ese sentido, a través de los autores Volke y Velasco (2002) y su publicación denominada “Tecnología de remediación para suelos contaminados”; se establece una clasificación de tecnologías de remediación, las cuales son: biológico, fisicoquímico y térmico.

La tecnología biológica se refiere a aquellos trabajos que analicen las actividades metabólicas de determinados organismos como plantas, hongos, bacterias, entre otros; ya sea para degradar, transformar o remover los contaminantes. Incluso Kaifer et al. (2004), menciona que las tecnologías fisicoquímicas incluyen la adición de enmiendas, electrocinética y oxidación ultravioleta. Por su parte, la tecnología fisicoquímica se entiende como el tipo de tratamiento que utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir la contaminación. Finalmente, la tecnología térmica utiliza el calor para incrementar la volatilización, descomposición o fundición de los contaminantes del suelo.

De los cuarenta y tres (43) artículos analizados, veintidós (22), coinciden en el empleo de la tecnología fisicoquímica para la remediación de suelos contaminados, quince (15) con la tecnología biológica y seis (6) utilizaron una combinación de las dos tecnologías anteriores.

Tabla 3*Tecnologías de remediación aplicadas a suelos contaminados por plomo*

Tecnología de remediación	Autor (año)	Título del artículo	Repositorio
Fisicoquímico	Hussein et al. (2019)	Remediation of lead-contaminated soil, Using clean energy in combination with electro-kinetic methods	Scopus
	Thangavadivel et al. (2018)	Case study of testing heavy-particle concentrator-aided remediation of lead-contaminated rifle shooting range soil	Scopus
	Huang et al. (2021)	Choline-based deep eutectic solvent combined with EDTA-2Na as novel soil washing agent for lead removal in contaminated soil	Scopus
	Li et al. (2019)	Comparison of Electrokinetic Remediation on Lead-Contaminated Kaolinite and Natural Soils	Scopus
	Chen et al. (2014)	Remediation of lead-contaminated soil using dissolved organic carbon solutions prepared by wine-processing waste sludge	Scopus
	Shen et al. (2019)	Temporal effect of MgO reactivity on the stabilization of lead contaminated soil	Scopus
	Liu et al. (2016)	Effect of Weathered Coal on the Leaching Behavior of Lead-Contaminated Soil with Simulated Acid Rain	Scopus
	Zhu et al. (2020)	Wood vinegar enhances humic acid-based remediation material to solidify Pb (II) for metal-contaminated soil	Scopus
	Ge et al. (2021)	Green remediation of high-lead contaminated soil by stabilization/solidification with insoluble humin: Long-term leaching and mechanical characteristics	Scopus
	Ma et al. (2020)	Synthesis of novel core-shell magnetic Fe ₃ O ₄ @C nanoparticles with carboxyl function for use as an immobilisation agent to remediate lead-contaminated soils	Scopus
Zhang et al. (2018)	Compound washing remediation and response surface analysis of lead-contaminated soil in mining area by fermentation broth and saponin	Scopus	

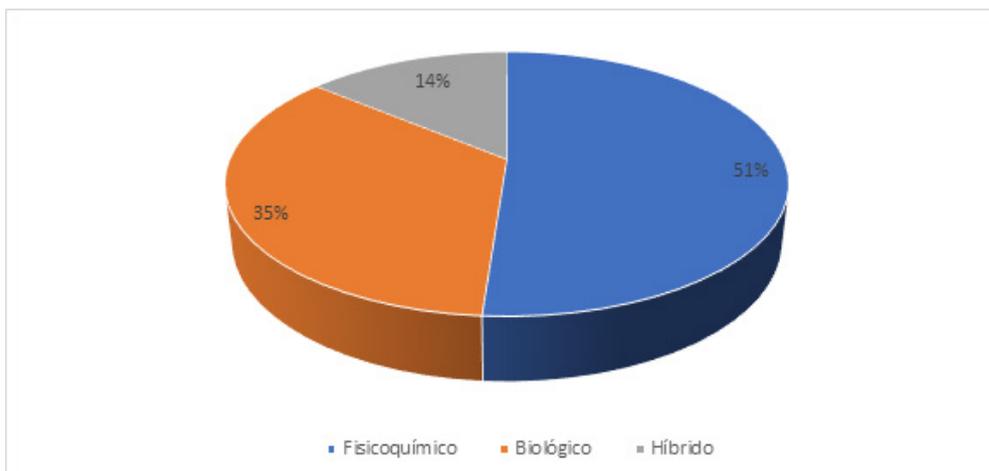
	Keykha et al. (2022)	Green Remediation for Lead-Contaminated Soil Using Carbon Dioxide Injection	Scopus
	Ge et al. (2020)	Effects of organic matter components and incubation on the cement-based stabilization/solidification characteristics of lead-contaminated soil	Scopus
	Thinh et al. (2021)	Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid	Science Direct
	Huang et al. (2022)	Remediation of lead-contaminated soil by washing with choline chloride-based deep eutectic solvents	Science Direct
	Wang et al. (2020)	Removal of Cu and Pb from contaminated agricultural soil using mixed chelators of fulvic acid potassium and citric acid	Science Direct
	Rui et al. (2024)	Remediation of Pb- and Cd-contaminated clayey soil via magnetic-enhanced washing	Science Direct
	Morales et al. (2022)	Simultaneous removal of arsenic and toxic metals from contaminated soil: Laboratory development and pilot scale demonstration	Science Direct
	Silwamba et al. (2021)	Simultaneous extraction and recovery of lead using citrate and micro-scale zero-valent iron for decontamination of polluted shooting range soils	Science Direct
	Liu et al. (2022)	Remediation of cadmium and lead contaminated soils using Fe-OM based materials	Science Direct
	Gong et al. (2020)	Removal of lead from two polluted soils by magnetic wheat straw biochars	Science Direct
	Patra et al. (2023)	Remediation of lead toxicity using phosphorus in lead-contaminated agricultural soils	Science Direct
Biológico	Singh et al. (2020)	Assessment of different multipurpose tree species for phytoextraction of lead from lead-contaminated soils	Scopus
	Ogundiran et al. (2018)	Compost and biochar assisted phytoremediation potentials of <i>Moringa oleifera</i> for remediation of lead contaminated soil	Scopus
	Teng et al. (2023)	Bioremediation system consisted with <i>Leclercia adecarboxylata</i> and nZVI@Carbon/Phosphate for lead immobilization: The passivation mechanisms of chemical reaction and biological metabolism in soil	Scopus

	Sun et al. (2017)	Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by <i>Solanum nigrum</i> L. with <i>Mucor circinelloides</i>	Scopus
	Teng et al. (2021)	Phosphate functionalized iron-based nanomaterials coupled with phosphate solubilizing bacteria as an efficient remediation system to enhance lead passivation in soil	Scopus
	Cheng et al. (2015)	Exploring the benefits of growing bioenergy crops to activate lead-contaminated agricultural land: a case study on sweet potatoes	Scopus
	Cheng et al. (2015)	Feasibility of using peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.) for phytoattenuation on lead-contaminated agricultural land-an in-situ study	Scopus
	Cheng et al. (2015)	Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land-An in-situ study and benefit assessment	Scopus
	Saghi et al. (2016)	Phytoremediation of lead-contaminated soil by <i>Sinapis arvensis</i> and <i>Rapistrum rugosum</i>	Scopus
	Ozkan et al. (2014)	Pyrolysis of hyperaccumulator plants used for the phytoremediation of lead contaminated soil	Scopus
	Rosariastuti et al. (2020)	A bioremediation process based on the application of rhizobium sp. I3 and ramie (<i>boehmeria nivea</i> L.) in lead contaminated soils	Scopus
	Lu et al. (2021)	Phytoremediation potential of four native plants in soils contaminated with lead in a mining area	Scopus
	Liu et al. (2018)	Investigation on microbial community in remediation of lead-contaminated soil by <i>Trifolium repens</i> L.	Scopus
	Chiwetalu et al. (2020)	Remedial ability of maize (<i>Zea-Mays</i>) on lead contamination under potted condition and non-potted field soil condition	Science Direct
	Oziegbe et al. (2021)	Assessment of heavy metal bioremediation potential of bacterial isolates from landfill soils	Science Direct
	Li et al. (2021)	Immobilization of high-Pb contaminated soil by oxalic acid activated incinerated sewage sludge ash	Scopus
Híbrido	He et al. (2022)	<i>Burkholderia cepacia</i> Enhanced Electrokinetic-Permeable Reaction Barrier for the Remediation of Lead Contaminated Soils	Scopus

Yang et al. (2016)	In situ remediation and phytotoxicity assessment of lead-contaminated soil by biochar-supported nHAP	Scopus
Jih-Hsing Chang et al. (2019)	The lead contaminated land treated by the circulation-enhanced electrokinetics and phytoremediation in field scale	Scopus
Herliana et al. (2019)	Utilization of biochar and <i>Trichoderma harzianum</i> to promote growth of shallot and remediate lead-contaminated soil	Scopus
Chang et al. (2019)	Effect, immobilization and cooperativity of amendments on remediation of pb-contaminated soil	Scopus

Figura 2

Tipo de tecnología aplicada en la remediación de suelos contaminados por plomo



Segunda Pregunta de investigación: Lugar de Remediación de Suelos Contaminados por Plomo

En la siguiente revisión sistemática se observó que los procesos de remediación de los estudios de investigación se llevaron a cabo en lugares diferentes. De acuerdo con ello se distinguieron dos tipos de tecnologías utilizadas: Ex situ e In situ.

La tecnología In situ hace mención de un conjunto de métodos y técnicas donde los procesos de remediación se llevan a cabo en el mismo lugar contaminado. Caso contrario con la tecnología Ex situ, en la cual el tratamiento aplicado se lleva a cabo fuera del lugar de origen a condiciones y procesos controlados (Volke y Velasco, 2002).

Por otra parte, en la tabla 5, de los cuarenta y tres (43) estudios evaluados, treinta y tres (33) de ellos realizaron sus investigaciones aplicando la tecnología Ex situ, mientras los otros diez (10) aplicaron la tecnología In situ.

Los estudios donde implementaron metodología Ex situ requirieron de excavación para remover el suelo contaminado antes de realizar el proceso de remediación. En estos estudios se realizó un mayor control del proceso y el tratamiento se dio en un menor tiempo; además, la mayoría de estos estudios presentaron una mayor rapidez de remediación en comparación a los estudios donde implementaron la tecnología In situ. Los estudios en la que se basaron en la tecnología In situ no fue necesario la excavación de los suelos contaminados para remediarlos.

Tabla 4*Lugar de remediación de suelos contaminados por plomo*

Lugar de remediación	Autores	Año
In situ	Hussein et al.	2019
In situ	Chiwetalu et al.	2020
In situ	Thangavadivel et al.	2018
In situ	Cheng et al.	2015
In situ	Cheng et al.	2015
In situ	Cheng et al.	2015
In situ	Liu et al.	2016
In situ	Rosariastuti et al.	2020
In situ	Chang et al.	2019
In situ	Yang et al.	2016
Ex situ	Zhang et al.	2018
Ex situ	Thinh et al.	2020
Ex situ	Gong et al.	2020
Ex situ	Wang et al.	2020
Ex situ	Rui et al.	2024
Ex situ	Morales et al.	2022
Ex situ	Silwamba et al.	2021
Ex situ	Oziegbe et al.	2021
Ex situ	Li et al.	2021
Ex situ	Singh et al.	2020
Ex situ	Huang et al.	2021
Ex situ	Ogundiran et al.	2018
Ex situ	Teng et al.	2023
Ex situ	Li et al.	2019
Ex situ	Sun et al.	2017
Ex situ	Teng et al.	2021
Ex situ	Chen et al.	2014
Ex situ	Saghi et al.	2016
Ex situ	Ozkan et al.	2014
Ex situ	He et al.	2022
Ex situ	Shen et al.	2019
Ex situ	Zhu et al.	2021
Ex situ	Ge et al.	2021
Ex situ	Patra et al.	2023
Ex situ	Huangliu et al.	2022
Ex situ	Liu et al.	2022
Ex situ	Liu et al.	2018
Ex situ	Ma et al.	2020
Ex situ	Lu et al.	2021

Ex situ	Chang et al.	2019
Ex situ	Keykha et al.	2022
Ex situ	Ge et al.	2020
Ex situ	Herliana et al.	2021

Nota. La tabla 4, muestra la remediación de suelos contaminados por plomo según el lugar de remediación, In situ y Ex situ.

Tabla 5

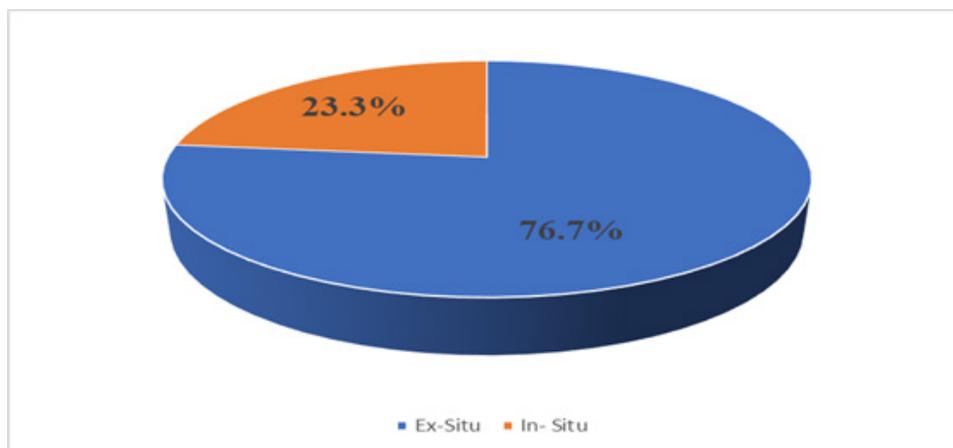
Resumen de los estudios de investigación por el lugar de remediación

Lugar de remediación	Nº Artículos
In situ	10
Ex situ	33
Total	43

Nota. En la presente tabla se muestra el número de investigaciones de acuerdo con el lugar de remediación In situ y Ex situ.

Figura 3

Lugar de remediación aplicada en la remediación de suelos contaminados por plomo



Tercera Pregunta de Investigación: Eficiencias de Remoción de Plomo en Suelos Contaminados

Se analizaron las diversas estrategias que apuntan los tipos de tratamiento en función a la remoción del plomo. En este ítem se brindará una revisión simplificada de las eficiencias de estos tratamientos. En algunos artículos de investigaciones, la eficiencia era reportada en rangos, por lo cual se optó por determinar el promedio para poder jerarquizar de una manera más simple. Para artículos que tienen varios casos, como por ejemplo en el que se diferencian por la cantidad de materia usada (dosis), combinación de diversas materias, entre otras, se escogió aquel sustrato o materia que tenga mayor eficiencia. A continuación, se proponen intervalos de eficiencia en porcentaje de manera particular, para así

poder categorizarlos, siendo de 80 a 100 % “alta eficiencia”, de 60 a 80 % “media - alta eficiencia”, 40 a 60 % “media eficiencia”, 20 a 40 % “baja eficiencia” y de 0 a 20 % “muy baja eficiencia”.

Para una eficiencia entre 80 a 100% categorizada como media-alta eficiencia, hubo 16 artículos en donde solo 3 realizaron la remediación in situ teniendo 3 tratamientos fisicoquímicos, los restantes (13) eran ex situ, donde 4 tenían un tratamiento biológico, 1 híbrido y los otros (8), fisicoquímicos. La mayor eficiencia que se encontró en este rango fue de los autores Silwamba, et al., quienes según su investigación titulada *Simultaneous extraction and recovery of lead using citrate and micro-scale zero-valent iron for decontamination of polluted shooting range soils* usaron citrato y Fe de valencia cero teniendo un 99% de remoción del plomo en el suelo.

Siguiendo la eficiencia entre 60 a 80% el cual es categorizada como media eficiencia, hubo 14 artículos donde 3 realizaron la remediación in situ el cual se diverge el tipo de tratamiento siendo 2 híbrido y 1 biológico, en los restantes (11) se realizaron el tratamiento ex situ dónde fueron 7 tratamientos fisicoquímicos, 1 biológico y 3 híbridos. La mayor eficiencia en este rango se obtuvo de los investigadores Morales, J. et al. con su artículo titulado *Simultaneous removal of arsenic and toxic metals from contaminated soil: Laboratory development and pilot scale demonstration* teniendo una eficiencia del 76%.

Respecto a una eficiencia entre 40 a 60 categorizada como alta eficiencia, hubo 5 artículos donde todos fueron ex situ, el tipo de tratamiento fue 2 biológicos y los restantes, fisicoquímicos. La mayor eficiencia encontrada fue del 58.6% usando la planta *Solanum nigrum* descrito por los autores Sun, et. al en su artículo *Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by Solanum nigrum L. with Mucor circinelloides*.

En una eficiencia 20 a 40 categorizada como baja eficiencia, los 4 artículos se realizaron ex situ. Según su tipo de tratamiento se diferencian en biológico (2) y los restantes, fisicoquímicos. Según Singh et al. (2020), en su artículo *“Assessment of different multipurpose tree species for phytoextraction of lead from lead-contaminated soils”* usando *Eucalyptus tereticornis Sm.* tuvo una eficiencia de 38.9%, siendo el de mayor eficiencia en este rango.

Finalmente, para una eficiencia de 0 a 20 categorizada como muy baja eficiencia, se tuvo 4 artículos donde 3 se realizaron in situ y fueron biológico, los restantes fueron ex situ y de tratamiento biológico; donde se destaca el artículo *“Phytoremediation of lead-contaminated soil by Sinapis arvensis and Rapistrum rugosum”* de los autores Cheng, et al removiendo el plomo en un 10.7%.

La mayoría de los artículos que se obtuvieron tenían una buena eficiencia cumpliendo el objetivo de dichos artículos, el cual es remover y/o eliminar el plomo en suelos contaminados con dicho metal.

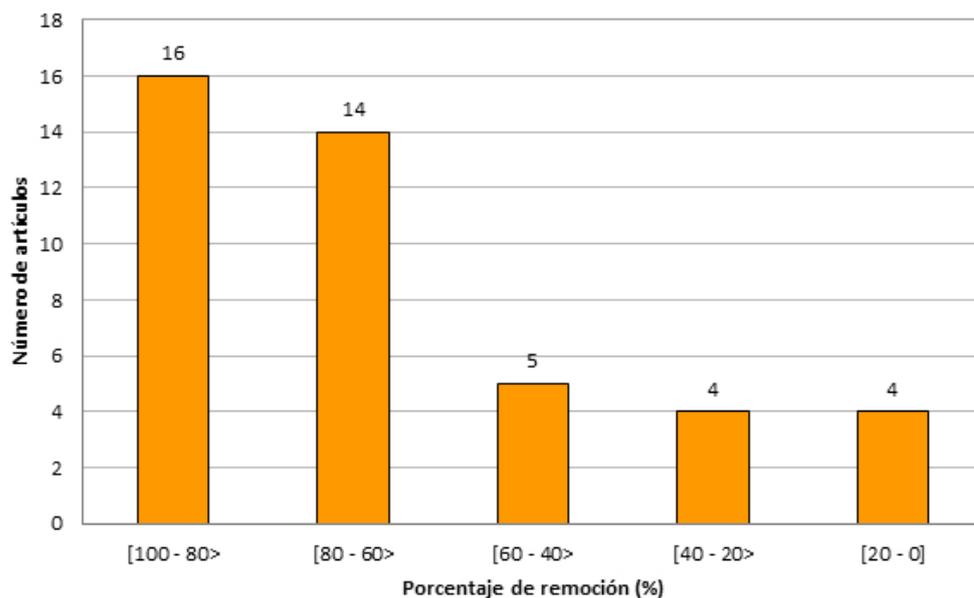
Tabla 6

Resumen de la cantidad de artículos por su eficiencia en la remoción de plomo en el suelo

Número de artículos	Eficiencia (%)
16	80 -100
14	60 - 80
5	40 - 60
4	20 - 40
4	0 - 20

Figura 4

Investigaciones realizadas sobre remediación de plomo en el suelo por país



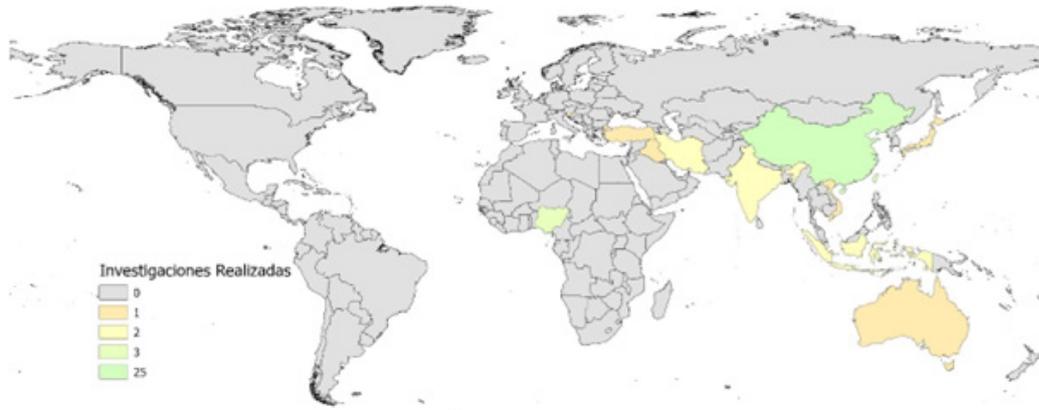
Nota. Como se aprecia en la Figura 4, la mayoría de las investigaciones, tienen una buena eficiencia para remover plomo siendo en total 30 los que tienen una eficiencia mayor a 60, y solo 13 con una eficiencia menor.

Cuarta Pregunta de Investigación: Países Donde se Realizan Investigaciones Sobre Remediación de Suelos Contaminados por Plomo

Con relación a un total de 43 artículos revisados de diferentes partes del mundo, se observó que los países asiáticos fueron los que desarrollaron un mayor número de artículos. China es el país con mayor número de artículos relacionados a la remediación de suelos contaminados por plomo con un total de 25 artículos, seguido por Taiwán y Nigeria que cuentan con 3 artículos cada uno; por otra parte, India, Irán e Indonesia cuentan con 2 artículos cada uno. Finalmente, países como Iraq, Vietnam, Eslovenia, Japón, Turquía y Australia cuentan con 1 artículo, ver Figura 5.

Figura 5

Investigaciones realizadas sobre remediación de plomo en el suelo por país



Quinta Pregunta de Investigación: Análisis de Evolución de Estudios de Remediación de Suelos Contaminados por Plomo

Para analizar la evolución de las investigaciones se realizó un conteo de las investigaciones publicadas en cada año, desde el año más antiguo hasta la actualidad como se observa en la Tabla 7 y en el rango de tiempo desde 2014-2024.

Se identificó un notable aumento en las investigaciones y la cantidad de estos es relativamente alta en comparación a los otros años desde el año 2018 hasta 2022 lo cual indica la relevante importancia que tuvo la remediación de suelos contaminados por plomo, debido a que el Pb es un metal altamente letal para los organismos vivos si se encuentra en su sistema ya que el metal no se degrada fácilmente y puede ser absorbido por plantas lo cual son ingeridos por organismos grandes como animales y humanos, tal como se menciona en el estudio de Gaya et al. (2016), como se citó en Patra et al. (2023).

Tabla 7

Resumen de número de investigación por año

Año	Nº de artículos
2014	3
2015	2
2016	3
2017	1
2018	4
2019	5
2020	7
2021	9
2022	6
2023	2
2024	1

Figura 6

Investigaciones realizadas sobre remediación de plomo en el suelo por año

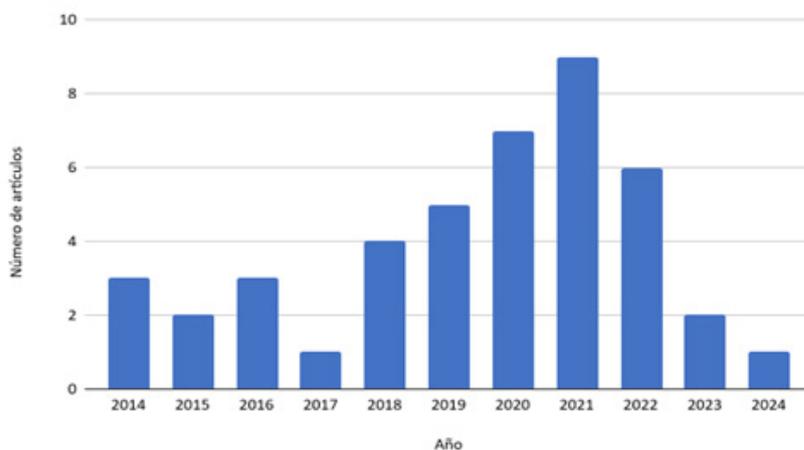


Tabla 8

Resumen del tipo de tratamiento en las investigaciones desde el 2014-2019 y 2020-2024

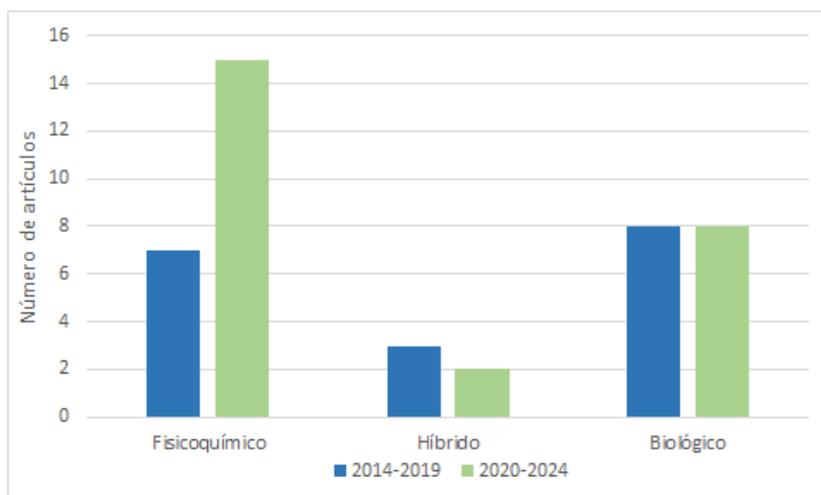
	Fisicoquímico	Híbrido	Biológico
2014-2019	7	3	8
2020-2024	15	2	8

También para analizar la evolución de las investigaciones se clasificó la cantidad de cada tratamiento en los rangos de años elegidos, en 2014-2019 el tratamiento fisicoquímico es de 7, en híbrido es 6 y biológico 8 lo cual son 18

investigaciones en esos 5 años; en cambio en 2020-2024 hay un notorio aumento en la cantidad total de investigaciones de 25 y en especial en la aplicación del tratamiento fisicoquímico tanto in situ como ex situ debido a que según Zhu et al. (2020) es rentable porque alteran las características físicas o químicas de los contaminantes o el medio contaminante para que el Pb puede adsorberse en la superficie de los aditivos o volverse sólido e insoluble para que ya no se encuentre biodisponible. Estas técnicas son más prometedoras que la biorremediación como lo demuestra la Figura 7 por la preferencia a aplicar este tratamiento ya sea por comunidades microbianas o plantas. El estudio de Ozkan et al. (2014) indica un novedoso uso de las plantas de maíz, colza y girasol en el que luego de la fitorremediación éstas son sometidas al proceso de pirólisis en el que el autor resalta que la biomasa seca contiene altos contenidos de Pb, pero el líquido presenta bajo contenido por lo que recomienda derivarlo al uso del combustible, lo que deja un vacío de que es lo que se debe hacer con la biomasa seca.

Figura 7

Avance de Investigaciones de tratamiento híbrido, biológico y fisicoquímico desde el 2014-2024



Discusión

En relación a la primera pregunta de investigación, se evidenció en la Figura 2 que la mayoría de autores (53.5%) basaron sus estudios de remediación de suelos contaminados por plomo mediante sistemas de tratamiento fisicoquímico; mientras que el 32.6%, optó por el uso del tratamiento biológico donde diversos microorganismos fueron los encargados de la extracción del metal pesado plomo; finalmente el 14% utilizó ambas tecnologías - fisicoquímica y biológica -, en esta revisión sistemática no se reportó estudios que hayan trabajado con la tecnología térmica.

En específico, los estudios donde emplearon tecnología fisicoquímica abarcaron una serie de tratamientos que incluye pantallas orbitales, uso de compuestos químicos - como etilendiaminotetraacético, óxido de magnesio, vinagre de madera, magnetita, etc - y electrocinética. Mientras que los autores que utilizaron la tecnología biológica emplearon organismos como *Trifolium repens L.*, *Boehmeria nivea L.*, *Rapistrum rugosum*, *Solanum nigrum*, *Mucor circinelloides*, *Leclercia adecarboxylata*, entre otros. Para las tecnologías híbridas, se utilizaron combinaciones como: cenizas de lodo activadas con ácido oxálico, biocarbón y nHAP, electrocinética y fitorremediación, biocarbón y *Trichoderma harzianum*, entre otros. Todo ello se especifica en la Tabla 3, donde se describen los artículos científicos con sus respectivas tecnologías de remediación, repositorio y autor.

En referencia a la segunda pregunta de investigación, se observa en la Figura 3 que el 76.7% de los estudios evaluados, implementan el uso tecnología *Ex situ* en su metodología para el tratamiento de remediación de suelos contaminado por Plomo, mientras un 23.3% implementan la tecnología *In situ*. Los estudios donde implementaron metodología *Ex situ* requirieron de excavación para remover el suelo contaminado antes de realizar el proceso de remediación, mientras los estudios en la que se basaron en la tecnología *In situ* no fue necesario la excavación del suelo contaminado para remediarlos. En las investigaciones *Ex situ* se realizaron un mayor control del proceso, y el tratamiento se dio en un menor tiempo; además, la mayoría de ellos presentaron una mayor rapidez de remediación en comparación a los estudios donde implementaron la tecnología *In situ*.

Referente a la tercera pregunta, se resalta de la Figura 4 que hay una alta a media eficiencia (40 - 100%) en aquellos estudios que son del tipo de tratamiento físico químico (el más empleado) y teniendo como lugar de tratamiento *ex situ*; la mayoría de estas investigaciones tuvieron resultados favorables solo unos 8 tuvieron una eficiencia bajo a muy bajo (0 - 40%) no resultando a favor de sus respectivas hipótesis.

En cuanto a la cuarta pregunta de investigación, se evidenció en la Figura 5 que el país con mayor número de investigaciones realizadas (25) es China, esto a pesar de que en la búsqueda de información se limitó a un idioma el cual no se trata de su lengua natal; mientras que el resto de los países de donde se obtuvo las investigaciones tiene un número menor en comparación a China con 18 investigaciones referentes a la remediación de plomo en el suelo. Por otra parte, mediante el presente estudio se conoce que el continente americano carece de investigaciones científicas sobre el tema aun sabiendo que en este continente se suscitan problemas medioambientales constantes referente a la contaminación por plomo.

Por último, en la quinta pregunta, se evidencia a partir de la Figura 6 el notorio aumento de las investigaciones desde el 2018 pero un descenso a partir de 2022 además también se evaluó la preferencia de los tratamientos para aplicar el cual en ambos rangos de años de 2014-2019 y 2020-2024 resalta el fisicoquímico además este predominó en 15 estudios del último rango de años por lo que debe

haber llamado la atención de lo accesible y rentable que es así como presenta una alta eficiencia de remoción o inmovilidad así como el tiempo de aplicación es menor que las de biorremediación, si bien hace una década se muestra un notorio interés por aplicar la fitorremediación ahora la atención se ha desviado hacia las enmiendas, aplicar la electrocinética para remover e inmovilizar el Pb a través de la adsorción o transformarlo a una sustancia insoluble.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses de ninguna índole.

Referencias

- Chang, J.H., Liu, Q.F., Yu, J., Wang, Y.T., Peng, W.D., Chen, J.Y., & Liu, W. (2019). Effect, Immobilization and Cooperativity of Amendments on Remediation of Pb-Contaminated Soil. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), 10637-10654. http://doi.org/10.15666/aeer/1705_1063710654
- Cheng, S.-F.; Huang C.-Y.; Chen K.-L.; Lin S.-C. & Lin Y.-C. (2015). Exploring the benefits of growing bioenergy crops to activate lead-contaminated agricultural land: a case study on sweet potatoes. *Environ Monit Assess*, 187, 144. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4247-y>
- Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, S.-C., Chen, K.-L., & Lin, Y.-C. (2015). Feasibility of using peanut (*Arachis hypogaea* L.) for phytoattenuation on lead-contaminated agricultural land—an in situ study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.018>
- Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-C., & Chen, K.-L. (2015). Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land—An in situ study and benefit assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.024>
- Chen, Y.-M., Lin, W.-H., Lin, Y.-A., Liu, C.-C., & Wang, M.-K. (2014). Remediation of lead-contaminated soil using dissolved organic carbon solutions prepared by wine-processing waste sludge. *Geoderma*, 235-236, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.004>
- Chiwetalu, U. J., Mbajorgu, C. C., & Ogbuagu, N. J. (2020). Remedial ability of maize (*Zea-Mays*) on lead contamination under potted condition and non-potted field soil condition. *Journal of bioresources and bioproducts*, 3(1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.006>
- De la Rosa-Pérez, D. A., Teutli-León, M. M. M., & Ramírez-Islas, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(3), 129-138.
- Ge S., Jiang W., Zheng L., Xie X., Pan Y. (2021). Green remediation of high-lead contaminated soil by stabilization/solidification with insoluble humin: Long-term leaching and mechanical characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 324, 09596526. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129184>
- Ge, S., Pan, Y., Zheng, L., & Xie, X. (2020). Effects of organic matter components and incubation on the cement-based stabilization/solidification characteristics of lead-contaminated soil. *Chemosphere*, 260, 127646. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127646>

- Gong, H., Chi, J., Ding, Z., Zhang, F., & Huang, J. (2020). Removal of lead from two polluted soils by magnetic wheat straw biochars. *Ecotoxicology and environmental safety*, 205, 111132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111132>
- He, Y., Yang, L., He, C., & Wang, F. (2022). Burkholderia cepacia enhanced electrokinetic-permeable reaction barrier for the remediation of lead contaminated soils. *Sustainability*, 14(18), 11440. <https://doi.org/10.3390/su141811440>
- Herliana, O., Ahadiyat, Y.R., & Cahyani, W. (2021). Utilization of biochar and Trichoderma harzianum to promote growth of shallot and remediate lead-contaminated soil. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(3), 2743-2750. <http://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.083.2743>
- Huang, K.Y., Wang, X.Y., Yuan, W.Y., Xie, J.Y., Wang, J.W., Li, J.H. (2022). Remediation of lead-contaminated soil by washing with choline chloride-based deep eutectic solvents. *Process Saf. and Environ*, 160, 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.034>
- Hussein, A. A., & Alatabe, M. J. A. (2019). Remediation of Lead-Contaminated Soil, Using Clean Energy in Combination with Electro-Kinetic Methods. *Pollution*, 5(4), 859-869. <https://doi.org/10.22059/poll.2019.275250.579>
- Huang, K., Shen, Y., Wang, X., Song, X., Yuan, W., Xie, J., Wang, S., Bai, J., & Wang, J. (2021). Choline-based deep eutectic solvent combined with EDTA-2Na as novel soil washing agent for lead removal in contaminated soil. *Chemosphere*, 279, 130568. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130568>
- Jih-Hsing Chang, Cheng-Di Dong, Shan-Yi Shen. (2019). The lead contaminated land treated by the circulation-enhanced electrokinetics and phytoremediation in field scale, *Journal of Hazardous Materials*, 368, 894-898. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.085>
- Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, E., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M., & Pijls, C. (2004). *Guía de tecnologías de recuperación de suelos contaminados*. Comunidad de Madrid, Consejería de medio ambiente y ordenación del territorio.
- Keykha, H.A., Ardakani, A., Talebi, H., & Romiani, H.M. (2022). Green Remediation for Lead-Contaminated Soil Using Carbon Dioxide Injection. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(4). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000712](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000712)

- Kushwaha, A., Hans, N., Kumar, S., & Rani, R. (2018). A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *147*, 1035–1045. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.049>
- Li, C., Hou, H., Yang, J., Liang, S., Shi, Y., Guan, R., Hu, Y., Xu, W., Hu, J., & Wang, L. (2019). Comparison of Electrokinetic Remediation on Lead-Contaminated Kaolinite and Natural Soils. *CLEAN - Soil, Air, Water*, *47*: 1800337. <https://doi.org/10.1002/clen.201800337>
- Li, J., Wang, Q., Chen, Z., Xue, Q., Chen, X., Mu, Y., & Poon, C. S. (2021). Immobilization of high-Pb contaminated soil by oxalic acid activated incinerated sewage sludge ash. *Environmental Pollution*, *284*, 117120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117120>
- Liu, G., Liao, B., Lu, T., Wang, H., Xu, L., Li, Z., & Ye, C. (2020). Insight into immobilization of Pb²⁺ in aqueous solution and contaminated soil using hydroxyapatite/attapulgite composite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *603*(125290), 125290. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125290>
- Liu, C., Lin, H., Dong, Y., Li, B., & Liu, Y. (2018). Investigation on microbial community in remediation of lead-contaminated soil by *Trifolium repens* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *165*, 52-60. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.054>
- Liu, J., Li, H., Wu, R., Zhu, Y., & Shi, W. (2016). Effect of weathered coal on the leaching behavior of lead-contaminated soil with simulated acid rain. *Water, Air, and Soil Pollution*, *227*(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3052-3>
- Liu, Q., Luo, J., Tang, J., Chen, Z., Chen, Z., Lin, Q., et al. (2022). Remediation of cadmium and lead contaminated soils using Fe-OM based materials. *Chemosphere*, *307*, 135853–135861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135853>
- Lu, N., Li, G., Sun, Y., Wei, Y., He, L., & Li, Y. (2021). Phytoremediation potential of four native plants in soils contaminated with lead in a mining area. *Land*, *10*(11), 1129. <http://doi.org/10.3390/land10111129>
- Ma, C., Liu, F.-Y., Wei, M.-B., Zhao J.-H., & Zhang H.-Z. (2020). Synthesis of Novel Core-Shell Magnetic Fe₃O₄@C Nanoparticles with Carboxyl Function for Use as an Immobilisation Agent to Remediate Lead-Contaminated Soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(3), 2273-2283. <http://doi.org/10.15244/pjoes/111232>

- Morales Arteaga, J. F., Gluhar, S., Kaurin, A., & Lestan, D. (2022). Simultaneous removal of arsenic and toxic metals from contaminated soil: Laboratory development and pilot scale demonstration. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 294, 118656. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118656>
- Ogundiran, M. B., Mekwunyei, N. S., & Adejumo, S. A. (2018). Compost and biochar assisted phytoremediation potentials of *Moringa oleifera* for remediation of lead contaminated soil. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2206-2213. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.025>
- Oziegbe, O., Oluduro, A. O., Oziegbe, E. J., Ahuekwe, E. F., & Olorunsola, S. J. (2021). Assessment of heavy metal bioremediation potential of bacterial isolates from landfill soils. *Saudi journal of biological sciences*, 28(7), 3948–3956. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.072>.
- Ozkan A., Banar M., Cokaygil Z., Kulac A., Yalcin G., Taspinar K., & Altay A. (2014). Pyrolysis of Hyperaccumulator Plants Used for the Phytoremediation of Lead Contaminated Soil. *Ekoloji*, 23(92), 51-56 <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2014.926>.
- Patra, S., Sengupta, S., Das, S., Mazumdar, D. (2023). Remediation of Lead Toxicity Using Phosphorus in Lead-Contaminated Agricultural Soils. *Clean - Soil, Air, Water*, 51(5), 1-10. <https://doi.org/10.1002/clen.202200309>
- Qiu, S., Cao, W., Chen, Z., Liu, Y., Song, J., Zhang, R., & Bai, H. (2021). Experiments and mechanisms for leaching remediation of lead-contaminated soil by enhancing permeability. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, 426, 130720. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130720>
- Rosariastuti, R., Sudadi, Supriyadi, & Prasasti, F. S. (2020). A bioremediation process based on the application of *Rhizobium* sp. I3 and *Ramie* (*Boehmeria nivea* L.) in lead contaminated soils. *Journal Für Kulturpflanzen*, 72(2-3), 40–48. <https://doi.org/10.5073/JfK.2020.02-03.02>
- Rui, D., Wang, Y., Nie, W., Kim, M., Zhang, J., Wang, S., Ito, Y., & Niu, F. (2024). Remediation of Pb- and Cd-contaminated clayey soil via magnetic-enhanced washing. *Pedosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.12.013>
- Saghi, A., Rashed Mohassel, M. H., Parsa, M., & Hammami, H. (2016). Phytoremediation of lead-contaminated soil by *Sinapis arvensis* and *Rapistrum rugosum*. *International Journal of Phytoremediation*, 18(4), 387–392. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109607>

- Shen, Z., Pan, S., Hou, D., O'Connor, D., Jin, F., Mo, L., Xu, D., Zhang, Z., & Alessi, D. S. (2019). Temporal effect of MgO reactivity on the stabilization of lead contaminated soil. *Environment International*, *131*, 104990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104990>
- Silwamba, M., Ito, M., Tabelin, C. B., Tabelin, C. B., Jeon, S., Takada, M., Kubo, Y., Hokari, N., Tsunekawa, M., & Hiroyoshi, N. (2021). Simultaneous extraction and recovery of lead using citrate and micro-scale zero-valent iron for decontamination of polluted shooting range soils. *Environmental Advances*, *5*, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100115>
- Singh, B., Kaur, B., & Singh, D. (2020). Assessment of different multipurpose tree species for phytoextraction of lead from lead-contaminated soils. *Bioremediation Journal*, *24*(4), 215-230. <https://doi.org/10.1080/10889868.2020.1811634>
- Sun, L., Cao, X., Min, L., Zhang, X., Li, X., & Cui, Z. (2017). Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. with *Mucor circinelloides*. *Environmental Science And Pollution Research*, *24*(10), 9681-9689. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8637-x>
- Teng, Z., Zhao, X., Jia, B., Ye, L., Tian, S., Guo, H., Guo, Y., Ji, X., Li, T., & Li, M. (2023). Bioremediation system consisted with *Leclercia adecarboxylata* and nZVI@Carbon/Phosphate for lead immobilization: The passivation mechanisms of chemical reaction and biological metabolism in soil. *Journal Of Environmental Management*, *340*, 117888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117888>
- Teng, Z., Zhao, X., Yuan, J., Li, M., & Li, T. (2021). Phosphate functionalized iron based nanomaterials coupled with phosphate solubilizing bacteria as an efficient remediation system to enhance lead passivation in soil. *Journal of hazardous materials*, *419*, 126433. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126433>
- Thangavadivel, K., Ranganathan, S., Sanderson, P., Chadalavada, S., Naidu, R., & Bowman, M. (2018). Case study of testing heavy-particle concentrator-aided remediation of lead-contaminated rifle shooting range soil. *Remediation*, *28*(3), 67-74. <https://doi.org/10.1002/rem.21561>
- Thinh, N. V., Osanai, Y., Adachi, T., Vuong, B. T. S., Kitano, I., Chung, N. T., & Thai, P. K. (2021). Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid. *Chemosphere*, *263*, 127912. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127912>

- Wang, Y., Lin, Q., Xiao, R., Cheng, S., Luo, H., Wen, X., Wu, L., & Zhong, Q. (2020). Removal of Cu and Pb from contaminated agricultural soil using mixed chelators of fulvic acid potassium and citric acid. *Ecotoxicology and environmental safety*, 206, 111179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111179>.
- Xiao, L., Cheng, X., Zhang, T., Guo, M., & Zhang, M. (2022). Efficient inorganic/organic acid leaching for the remediation of protogenetic lead-contaminated soil. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(8), 3995. <https://doi.org/10.3390/app12083995>
- Yang, Z., Fang, Z., Tsang, P. E., Fang, J., & Zhao, D. (2016). In situ remediation and phytotoxicity assessment of lead-contaminated soil by biochar-supported nHAP. *Journal of Environmental Management*, 182, 247–251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.079>
- Zhang, H., Wang, Z., & Gao, Y. (2018). Compound washing remediation and response surface analysis of lead-contaminated soil in mining area by fermentation broth and saponin. *Environmental science and pollution research international*, 25(7), 6899–6908. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0971-5>
- Zhu, J., Gao, W., Zhao, W., Ge, L., Zhu, T., Zhang, G., & Niu, Y. (2020). Wood vinegar enhances humic acid-based remediation material to solidify Pb(II) for metal-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(10), 12648–12658. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11202-3>