



Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales

Origin, distribution, and dynamics of heavy metals in agricultural soils: edaphic and environmental implications

Mario A. Anaya-Raymundo^{1*}; Alejandro Ruíz-Janje¹; Luz P. Blas-Montenegro¹
Rafael M. Angulo-Valdivia²; Dante P. De la Cruz Cámaco³

1 Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad Católica Sedes Sapientiae. Jr. Gonzales Prada 398, Los Olivos, Lima, Perú.

2 Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. Ciudad Universitaria, Av. Enrique Guzmán y Valle N° 951, Lurigancho-Chosica, Lima, Perú.

3 Área de Ciencias-Matemática y Estadística, Universidad Tecnológica del Perú. Av. Nicolás Ayllón 15487, Ate, Lima, Perú.

* Autor correspondiente: manaya@ucss.edu.pe (M. Anaya-Raymundo).

ORCID de los autores

M. Anaya: <https://orcid.org/0000-0002-7423-1595>

A. Ruiz: <https://orcid.org/0000-0003-1534-6269>

L. Blas: <https://orcid.org/0000-0002-9405-2877>

R. Angulo: <https://orcid.org/0000-0002-8198-8406>

D. De la Cruz: <https://orcid.org/0000-0003-2972-8102>

RESUMEN

El aumento de la actividad industrial, minera y agrícola, especialmente debido al uso intensivo de fertilizantes, junto con el riego con aguas residuales ha incrementado significativamente la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas. Entre los contaminantes más comunes se encuentran el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el mercurio (Hg) y el arsénico (As). Este artículo de revisión analiza el comportamiento de estos metales en el suelo, su retención y los efectos que generan, considerando las propiedades del suelo como un factor clave. También se examina su movilidad y disponibilidad en suelos agrícolas, explicando cómo dependen de factores como el pH, la materia orgánica, la textura del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Además, se estudia cómo varía la absorción de estos contaminantes según la especie vegetal, la disponibilidad del metal en el suelo y las características fisicoquímicas del terreno. El estudio destaca la urgencia de implementar sistemas de monitoreo continuo, fomentar prácticas agrícolas sostenibles y aplicar regulaciones más estrictas para mitigar la contaminación de los suelos agrícolas. Futuras investigaciones deberían centrarse en el desarrollo de modelos predictivos sobre la dinámica de metales pesados en distintos tipos de suelo, la evaluación a largo plazo de técnicas de biorremediación y el impacto combinado del cambio climático y las prácticas agrícolas en la movilidad de estos contaminantes.

Palabras clave: movilidad; biodisponibilidad; sostenibilidad; productividad agrícola; agroecología.

ABSTRACT

The increase in industrial, mining, and agricultural activities, especially due to the intensive use of fertilizers and irrigation with wastewater, has significantly raised the presence of heavy metals in agricultural soils. Among the most common contaminants are cadmium (Cd), lead (Pb), mercury (Hg), and arsenic (As). This review article examines the behavior of these metals in soil, their retention, and the effects they cause, considering soil properties as a key factor. Their mobility and availability in agricultural soils are also analyzed, explaining how they depend on factors such as pH, organic matter, soil texture, and cation exchange capacity (CEC). Furthermore, the study explores how the uptake of these contaminants varies depending on plant species, metal availability in the soil, and the physicochemical characteristics of the land. The research highlights the urgency of implementing continuous monitoring systems, promoting sustainable agricultural practices, and enforcing stricter regulations to mitigate soil contamination. Future research should focus on the development of predictive models for the dynamics of heavy metals in different soil types, the long-term evaluation of bioremediation techniques, and the combined impact of climate change and agricultural practices on the mobility of these contaminants.

Keywords: mobility; bioavailability; sustainability; agricultural productivity; agroecology.

Recibido: 13-02-2025.

Aceptado: 09-06-2025.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Los suelos agrícolas son un recurso fundamental para la vida en nuestro planeta. No solo constituyen la base de la producción de alimentos, sino que también sustentan los ecosistemas y sirven de hogar a incontables formas de vida (Chen et al., 2023; Hu et al., 2024). Sin embargo, la creciente contaminación por metales pesados supone un grave peligro para su calidad, afectando no solo la seguridad alimentaria, sino también la salud humana y el equilibrio ambiental (Liu et al., 2023; Liu et al., 2024).

La relevancia de los suelos agrícolas va mucho más allá de la producción de alimentos. En primer lugar, estos suelos son el pilar de la agricultura, ya que de su calidad depende tanto la cantidad como la calidad de los cultivos (Castañeda et al., 2025). Un suelo fértil y sano es clave para obtener buenos rendimientos y garantizar la sostenibilidad de las cadenas alimentarias. Además, desempeñan un rol central en el bienestar humano, ya que son un recurso imprescindible para el desarrollo económico, social y ambiental. También son componentes esenciales de los ecosistemas, pues contribuyen a su estabilidad y biodiversidad (Dong et al., 2023). Finalmente, los suelos agrícolas albergan microorganismos y plantas que juegan un papel crucial en los ciclos naturales de la Tierra, ayudando a mantener el equilibrio ambiental (Wu et al., 2024). A pesar de su importancia, los suelos agrícolas enfrentan muchas amenazas, entre las cuales destaca la contaminación por metales pesados como una de las más graves. Este problema tiene su origen en actividades humanas como la industrialización, la minería, el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, y el riego con aguas residuales (Chen et al., 2024; Zhu et al., 2024). Metales como el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el plomo (Pb) y el arsénico (As) se acumulan en los suelos, dañando su calidad y afectando sus funciones ecológicas (Jing et al., 2023).

La acumulación de metales pesados tiene múltiples consecuencias negativas. Por un lado, degrada la calidad del suelo, reduciendo su actividad biológica y limitando la disponibilidad de nutrientes, lo que afecta el crecimiento de las plantas y disminuye la productividad agrícola (Tang et al., 2024). Por otro lado, estos contaminantes pueden ser absorbidos por las plantas y entrar en la cadena alimentaria, poniendo en riesgo la salud humana. El consumo de alimentos contaminados puede causar enferme-

dades graves, desde problemas digestivos hasta cáncer (Liu et al., 2023). Además, los metales pesados contaminan otros recursos naturales, como el agua, y representan una amenaza para la biodiversidad. Los metales pesados llegan a los suelos agrícolas desde diversas fuentes. Entre ellas están las actividades industriales, la minería, el uso descontrolado de fertilizantes y pesticidas, y el riego con aguas contaminadas. Incluso las emisiones industriales y de tráfico pueden depositarse en los suelos, agravando el problema (Anaya et al., 2022; Aslam et al., 2024).

Cada metal pesado tiene riesgos particulares. Así, el cadmio es altamente absorbido por las plantas, mientras que el mercurio y el plomo son extremadamente tóxicos tanto para los humanos como para el medio ambiente. Metales como el cobre (Cu) y el zinc (Zn), aunque esenciales en pequeñas cantidades, se vuelven dañinos en concentraciones elevadas (Rai et al., 2019).

Dada la gravedad de este problema, es urgente tomar medidas para frenar la acumulación de metales pesados en los suelos agrícolas. Una estrategia prometedora es la fitorremediación, que utiliza plantas especiales para extraer metales del suelo (Musarrat et al., 2024). También se exploran los nanomateriales que podrían reducir la disponibilidad de estos metales y limitar su impacto (Chen et al., 2024). Al mismo tiempo, es crucial promover prácticas agrícolas sostenibles que limiten el uso de productos químicos y fomenten la conservación del suelo. El monitoreo constante de la contaminación es otra herramienta clave para identificar áreas en riesgo y prevenir mayores daños. Acciones como la rotación de cultivos, el uso de fertilizantes orgánicos y la recuperación de suelos degradados son pasos importantes hacia la preservación de la calidad del suelo a largo plazo (Li et al., 2024).

La calidad de los suelos agrícolas es esencial para garantizar la seguridad alimentaria, la salud de las personas y la estabilidad de los ecosistemas. Sin embargo, la acumulación de metales pesados pone en peligro estas funciones vitales. Es crucial adoptar medidas para frenar esta contaminación y proteger la sostenibilidad de los suelos agrícolas. Con la investigación, la innovación y la implementación de prácticas más responsables, podemos mitigar los riesgos y salvaguardar este recurso esencial para las generaciones presentes y futuras (Li et al., 2024).

IMPORTANCIA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS Y AMENAZAS POR METALES PESADOS

Los suelos agrícolas son fundamentales para garantizar la producción de alimentos y la seguridad alimentaria. Sin embargo, enfrentan una grave amenaza debido a la contaminación por metales pesados. Elementos como el cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn), mercurio (Hg) y arsénico (As) pueden acumularse en los suelos, principalmente a raíz de actividades humanas como la industria, la minería, el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, el riego con aguas residuales, las emisiones vehiculares, la deposición atmosférica, los desechos de fundicio-

nes, la quema de petróleo e incluso los residuos hospitalarios (Hu et al., 2023). La naturaleza persistente y no degradable de los metales pesados los convierte en contaminantes de larga duración. Su acumulación genera consecuencias negativas tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Una de las principales formas de exposición a estos metales ocurre a través del consumo de cultivos contaminados. Las plantas absorben los metales presentes en el suelo, lo que lleva a su acumulación en los alimentos que posteriormente son ingeridos por las personas (Wang et al., 2023).

La exposición prolongada a metales pesados puede provocar serios problemas de salud, incluyendo daños neurológicos, enfermedades renales, trastornos digestivos e incluso cáncer. Algunos de estos metales, como el As, el Cr y el Ni, están clasificados como cancerígenos. Los niños, en particular, son

especialmente vulnerables a los efectos tóxicos de estos elementos debido a su menor peso corporal y a una mayor proporción de ingesta relativa, lo que incrementa significativamente los riesgos a los que están expuestos (Wei et al., 2023).

FUENTES DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

Las fuentes de contaminación por metales pesados en los suelos pueden clasificarse en naturales y antropogénicas, siendo estas últimas las que generan un mayor impacto debido a las actividades humanas. Dentro de las fuentes naturales, destaca la erosión de rocas y minerales, un proceso que, a través de la meteorización, libera metales pesados al suelo de manera paulatina. También es importante la deposición atmosférica, donde metales presentes en el aire llegan al suelo mediante la lluvia, el polvo y otras partículas suspendidas (Upadhyay et al., 2024). En algunos casos, como con el As, la deposición atmosférica puede ser una fuente significativa, aunque ciertas barreras, como películas de plástico en cultivos, pueden limitar esta transferencia (Jing et al., 2023). Por otro lado, las fuentes antropogénicas representan una amenaza más intensa y directa para la calidad de los suelos. Entre estas actividades, las industriales tienen un papel destacado, ya que procesos como la fundición de metales, la producción de cemento, la combustión de carbón y la fabricación de baterías generan emisiones que contaminan con metales pesados. La minería también es una de las principales fuentes de contaminación, ya que tanto la extracción como el procesamiento de minerales liberan grandes cantidades de metales al medio ambiente (Wei et al., 2023).

La agricultura contribuye significativamente a la acumulación de metales pesados en los suelos debido al uso de fertilizantes químicos, especialmente los fosfatados, y de estiércol animal, que, aunque mejora la fertilidad, puede contener metales como Cu y Zn. Además, los pesticidas y otros insumos agrícolas incrementan la concentración de metales en los suelos, sobre todo en áreas de cultivo intensivo. El riego con aguas residuales, particularmente cuando estas no están tratadas adecuadamente, es otra fuente importante de metales pesados; dichas aguas suelen contener residuos peligrosos que terminan acumulándose en los suelos agrícolas (Anaya et al., 2022; Mfopou et al., 2024). El tráfico vehicular también es una fuente de contaminación significativa, pues las emisiones de los vehículos y el desgaste de frenos liberan metales como el plomo (Pb), que se acumulan en los suelos cercanos a las carreteras. Finalmente, los residuos urbanos e industriales, especialmente aquellos depositados en vertederos, liberan metales pesados que pueden infiltrarse en el suelo y contaminar el entorno circundante (Hu et al., 2024). Estas diversas fuentes de contaminación, tanto naturales como antropogénicas, subrayan la importancia de controlar y mitigar los factores que contribuyen a la acumulación de metales pesados en los suelos para proteger tanto el medio ambiente como la salud humana (Hu et al., 2025).

DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

La distribución de los metales pesados en los suelos agrícolas no es uniforme y depende de varios factores (Wang et al., 2023), incluyendo:

Tipo de suelo: Las propiedades del suelo, como el pH, el contenido de materia orgánica, la textura y la capacidad de intercambio catiónico, influyen en la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados.

Prácticas de manejo: Las prácticas agrícolas, como el tipo de cultivo, el uso de fertilizantes y el riego, afectan la acumulación de metales en el suelo.

Proximidad a fuentes de contaminación: Los suelos cercanos a zonas industriales, mineras o urbanas tienden a tener mayores concentraciones de metales pesados.

Profundidad del suelo: Generalmente, la concentración de metales pesados es mayor en las capas superficiales del suelo.

Condiciones climáticas: La precipitación y la temperatura pueden afectar la movilidad de los metales en el suelo.

PROPIEDADES EDÁFICAS Y LA DINÁMICA DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

La relación entre las propiedades edáficas y la dinámica de metales pesados en suelos agrícolas es compleja y multifactorial, influenciada tanto por las características inherentes del suelo como por factores externos como las prácticas agrícolas y la contaminación (Liu et al., 2025). Diversos estudios resaltan que las propiedades del suelo no solo influyen directamente en la acumulación de metales pesados, sino también indirectamente, al afectar la movilidad y la biodisponibilidad de estos

contaminantes (Li et al., 2023; Sun 2023; Mfopou et al., 2024). Así, algunas de las relaciones clave son:

Materia orgánica del suelo (MOS)

Existe una fuerte correlación positiva entre el contenido MOS y la acumulación de ciertos metales pesados como el Zn y el Cu. Esto se debe a que la materia orgánica tiene una alta capacidad de adsorción de metales, formando complejos estables que pueden influir en la biodisponibilidad

de estos elementos. La aplicación de estiércol orgánico, una fuente común de materia orgánica, también puede ser una vía de introducción de Cu y Zn al suelo. La adición de nanomateriales puede aumentar el pH del suelo y la materia orgánica, lo que reduce la acumulación de metales pesados en los cultivos (Wang et al., 2023).

pH del suelo

El pH es un factor crítico que afecta la especiación química y la movilidad de los metales pesados en el suelo. En condiciones de acidez, los metales como el Cd pueden liberarse de fracciones relativamente estables, aumentando su extractabilidad. En contraste, el Pb puede formar minerales insolubles, reduciendo su movilidad. Generalmente, en suelos alcalinos, la transferencia de metales tóxicos a las plantas se ve disminuida. La aplicación de nanomateriales puede aumentar el pH del suelo, lo cual, junto con un aumento de la materia orgánica, ayuda a reducir la acumulación de metales pesados en los cultivos (Chen et al., 2024).

Nutrientes del suelo (nitrógeno, fósforo y potasio)

Existe una relación compleja entre los nutrientes del suelo y la dinámica de metales pesados. Por ejemplo, se ha encontrado una correlación positiva entre las concentraciones de Cd, Cu y Zn y los niveles de TP (fósforo total), TN (nitrógeno total) y TK (potasio total). La aplicación de fertilizantes nitrogenados puede disminuir la solubilidad del Pb y Cd en el suelo. En arrozales, la concentración disponible de Cd en el suelo se correlaciona negativamente con el contenido de N y las concentraciones disponibles y totales de P, lo que indica que estos nutrientes pueden inhibir la transferencia de Cd a los granos de arroz. El TK presenta una correlación negativa con el Ni y el Cu (Rai et al., 2019).

Textura del suelo

La textura del suelo también puede influir en la retención y movilidad de los metales pesados. Las partículas finas, como la arcilla, tienen una mayor superficie específica y capacidad de adsorción que

las partículas más grandes, como la arena (Tomczyk et al., 2023).

Actividad microbiana

Los microorganismos del suelo juegan un papel importante en la dinámica de metales pesados, ya que pueden influir en la especiación, solubilidad y movilidad de estos contaminantes. Por ejemplo, la adición de nanomateriales puede afectar a las comunidades microbianas del suelo, lo que a su vez puede influir en la biodisponibilidad de los metales pesados. Las comunidades bacterianas se ven afectadas por la concentración de metales pesados, aunque estudios indican que factores geoquímicos pueden tener un efecto mayor en la estructura de las comunidades bacterianas. Los genes de resistencia a metales (MRG) en las comunidades bacterianas están controlados por los metales pesados, las propiedades químicas y la comunidad bacteriana, mientras que los genes de resistencia a antibióticos están principalmente controlados por la comunidad bacteriana (Hu et al., 2024).

Otros factores

La aplicación de nanomateriales puede reducir la biodisponibilidad de metales pesados y disminuir su acumulación en los cultivos. Los exudados de las raíces también pueden influir en la disponibilidad de metales, al cambiar el pH y el potencial redox del suelo (Chen et al., 2024).

Es importante señalar que estas relaciones pueden variar dependiendo del tipo de suelo, el tipo de metal pesado y las prácticas de manejo agrícola. Por ejemplo, algunos metales, como el Pb, pueden acumularse en los tejidos vegetales independientemente de sus concentraciones disponibles en el suelo, mientras que otros, como el Cd y el Cu, sí se ven influenciados por la disponibilidad en el suelo y por otros elementos como el nitrógeno y el fósforo. La capacidad de los cultivos para absorber metales varía según la especie y el tipo de tejido, siendo los cultivos de hoja los que tienden a acumular más Hg, As y Zn, mientras que los cultivos de grano muestran una menor acumulación de Cd y Cu (Jing et al., 2023).

INTERACCIONES METAL-SUELO Y SUS IMPLICACIONES AGROECOLÓGICAS

Las interacciones entre metales pesados y el suelo son complejas y tienen importantes implicaciones agroecológicas, afectando la salud del suelo, la biota, las plantas y la seguridad alimentaria (Tomczyk et al., 2023). Estas interacciones dependen de las propiedades del suelo (pH, materia orgánica, textura), el tipo de metal, las prácticas agrícolas y la presencia de otros contaminantes (Tabla 1).

La movilidad y biodisponibilidad de los metales están influenciadas por el pH del suelo y la materia orgánica. En suelos ácidos, el cadmio (Cd) es más móvil, mientras que en suelos alcalinos su transferencia a la planta disminuye. Los fertilizantes pueden favorecer la co-migración y adsorción de metales pesados y nutrientes. En arrozales, el nitrógeno y el fósforo pueden reducir la transferencia de Cd a los granos (Zhang et al., 2023).

Los metales pesados alteran las comunidades microbianas y afectan a la biota del suelo, dañando microorganismos e invertebrados. En las plantas, los niveles de acumulación dependen de la especie y del tejido afectado; los cultivos de hoja, como la lechuga, acumulan más metales que los de grano. Factores como el factor de bioconcentración (BCF) y el de transferencia (TF) evalúan la transferencia de metales del suelo a las plantas, observándose interacciones sinérgicas entre elementos como el As y el Cd (Xu et al., 2024).

Para mitigar los efectos de los metales pesados, se emplean estrategias como la fitorremediación, el uso de nanomateriales y enmiendas químicas, además de prácticas agrícolas sostenibles. Los sistemas de invernadero muestran mayor acumulación de metales debido a la alta densidad de plantación y el uso intensivo de fertilizantes, en

comparación con los cultivos a campo abierto (Jing et al., 2023; Yang et al., 2024).

El manejo adecuado de los suelos agrícolas y la implementación de estrategias de remediación son esenciales para minimizar los riesgos de contaminación por metales pesados y garantizar la sostenibilidad de los sistemas agroecológicos (Upadhyay, Kumar, & Kumari, 2024).

El comportamiento de los metales pesados en suelos agrícolas está influenciado por varios mecanismos de adsorción y desorción, que determinan su movilidad y biodisponibilidad. Estos procesos son esenciales para entender los procesos de acumulación de los metales pesados en el suelo y como son adsorbidos por las plantas (Wang et al., 2023).

Tabla 1
Interacciones metal-suelo y sus implicaciones agroecológicas

Interacción Metal-Suelo	Implicaciones Agroecológicas	Fuentes
Fuentes de metales pesados en el suelo	Fuentes Naturales: Meteorización de rocas madre. Fuentes Antropogénicas: Actividades industriales (minería, fundición), quema de combustibles fósiles, uso de fertilizantes y pesticidas, irrigación con aguas residuales, deposición atmosférica. El uso de estiércol como fuente de Cu y Zn.	Aslam et al. (2024); Yang et al. (2024); Yu et al. (2024); Zhu et al. (2024).
Movilidad y biodisponibilidad	pH del suelo: En suelos ácidos, metales como el Cd pueden volverse más móviles y biodisponibles; en suelos alcalinos, la transferencia a las plantas disminuye. Materia Orgánica del Suelo (MOS): Adsorbe metales pesados, formando complejos que influyen en su biodisponibilidad; alta correlación positiva con la acumulación de ciertos metales como Zn y Cu. Textura del suelo: Partículas finas (arcilla) tienen mayor capacidad de adsorción.	Sun et al. (2023); Tomczyk et al. (2023); Xu et al. (2024).
Interacción con nutrientes del suelo	Fósforo (P): Correlación positiva con metales como Zn, As, Cd y Pb, lo que sugiere co-migración y adsorción. Nitrógeno (N): Correlación negativa entre disponibilidad de Cd y contenido de N en arrozales. Aplicación de fertilizantes nitrogenados puede disminuir la solubilidad del Pb y Cd en el suelo. Potasio (K): Correlación negativa con Ni y Cu.	Liu et al. (2023).
Efectos en la biota del suelo	Microorganismos: Alteración de procesos microbianos e interacciones suelo-microbio; las comunidades bacterianas afectadas por la concentración de metales, cambios en estructura, pueden inducir resistencia bacteriana a antibióticos y metales. Otros: Efectos adversos en insectos beneficiosos e invertebrados.	Hu et al. (2024).
Absorción por plantas	Vías de absorción: Raíces y hojas. Especies: Cultivos de hoja acumulan más Hg, As y Zn; cultivos de grano muestran menor acumulación de Cd y Cu. Factores: BCF (factor de bioconcentración) y TF (factor de transferencia) evalúan acumulación. Interacción sinérgica entre As y Cd, la presencia de Cd aumenta acumulación de As. El plomo se acumula mayormente en las raíces.	Xu et al. (2024); Mfopo et al. (2024); Liu et al. (2023).
Impacto en la salud humana	Riesgos: Ingestión de alimentos contaminados puede causar problemas de salud, cáncer gastrointestinal, problemas inmunológicos y retraso en el crecimiento mental.	Chen et al. (2023).
Remediación	Fitorremediación: Uso de plantas para extraer o inmovilizar metales. Nanomateriales: Reducir la biodisponibilidad de metales. Enmiendas químicas: Modificar el suelo para reducir la movilidad de metales. Uso de zeolitas sintéticas, biochar y otros materiales.	Jing et al. (2023).
Prácticas de manejo agrícola	Intensidad de plantación: Sistemas de cultivo en invernadero (PSS) tienden a mayor contaminación. Uso de fertilizantes y estiércol: Fuentes directas de metales pesados. Riego con aguas residuales: Introduce metales al suelo.	Jing et al. (2023); Aslam et al. (2024); Liu et al. (2025).
Dinámica de metales en el suelo	Factores: La acumulación de metales en el suelo es influenciada por la pendiente del suelo, la elevación, el uso de la tierra, la actividad industrial y la proximidad a ríos y carreteras. El viento y la deposición atmosférica también son factores importantes. Tipos de suelo: La contaminación por metales varía según el tipo de suelo.	Jing et al. (2023).

MECANISMOS DE ADSORCIÓN Y DESORCIÓN

Mecanismos de Adsorción

Complejación

Los metales pesados pueden formar complejos con la materia orgánica del suelo (MOS), como el ácido húmico. La estabilidad de estos complejos varía

entre metales, siendo más fuerte para el cobre (Cu) que para el zinc (Zn), el plomo (Pb), el níquel (Ni), el cadmio (Cd), y el manganeso (Mn). Esta complejación puede disminuir la disponibilidad de los metales para la absorción por las plantas (Tang et al., 2024).

Adsorción a óxidos e hidróxidos

Los óxidos e hidróxidos de hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn) presentes en el suelo tienen una gran capacidad para adsorber metales pesados. La adsorción puede ocurrir a través de enlaces químicos en la superficie de estos minerales. Por ejemplo, el plomo puede formar minerales con Al y fósforo (P) en suelos ácidos, lo que disminuye su movilidad (Xu et al., 2024).

Precipitación

En suelos con pH elevado, algunos metales pueden precipitar como hidróxidos o carbonatos, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad. El plomo, por ejemplo, puede precipitar como $PbSO_4$, $PbCO_3$, y $Pb(OH)_2$ (Tang et al., 2024).

Intercambio iónico

Los metales pesados pueden ser retenidos en el suelo por intercambio iónico con las cargas negativas presentes en las arcillas y la materia orgánica. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo es una medida de esta capacidad de retención (Xu et al., 2024).

Adsorción por nanomateriales

Los nanomateriales como las nanopartículas de óxido de hierro, sílice, cobre y zinc pueden adsorber metales pesados debido a su alta relación superficie/volumen. Estas nanopartículas pueden ser funcionalizadas con grupos químicos como metilo ($-CH_3$), aminas ($-NH_2$), y carboxilo ($-COOH$) para mejorar su capacidad de unión a los metales (Chen et al., 2024).

Mecanismos de desorción (Liu et al., 2023)

Cambios en el pH

La acidificación del suelo puede liberar metales que están unidos a partículas del suelo, aumentando su biodisponibilidad. Los suelos ácidos pueden aumentar la solubilidad y la movilidad de metales como el cadmio.

Reducción de óxidos

La reducción de óxidos de Fe, Mn, y otros elementos presentes en el suelo pueden liberar metales que estaban adsorbidos en sus superficies.

Interacciones con aniones y materia orgánica

La presencia de aniones como sulfatos, fosfatos, y cloruros en la solución del suelo puede competir con los metales por los sitios de adsorción en el suelo, promoviendo su desorción. Asimismo, la materia orgánica disuelta (MOD) puede formar complejos con metales que pueden ser más móviles que los metales inmovilizados en otras formas.

Actividad biológica

A nivel del suelo algunos microorganismos pueden liberar ácidos orgánicos o sideróforos que facilitan la desorción de metales.

Factores que influyen en la adsorción y desorción de metales pesados (Liu et al., 2024)

Tipo de metal

La afinidad de cada metal por los sitios de adsorción en el suelo varía. Algunos metales, como

el Hg tienen alta afinidad por la materia orgánica, mientras que otros, como el Pb, pueden formar precipitados insolubles en ciertas condiciones.

Propiedades del suelo

El pH, la cantidad y tipo de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la textura del suelo (proporción de arena, limo y arcilla), el contenido de óxidos e hidróxidos, la concentración de aniones, y la presencia de otros metales influyen en la adsorción y desorción de metales pesados.

Condiciones ambientales

Factores como la temperatura y la humedad del suelo pueden modificar los procesos de adsorción y desorción, como la lixiviación de los metales pesados con la lluvia.

Movilidad y biodisponibilidad

La movilidad de los metales en el suelo se refiere a su capacidad para moverse a través de la solución del suelo. La movilidad se refiere a la capacidad de los metales para desplazarse a través de la solución del suelo, mientras que la biodisponibilidad es la fracción del metal que está disponible para ser absorbida por las plantas y otros organismos (Rai et al., 2019). La movilidad y la biodisponibilidad de los metales son cruciales para su acumulación en las plantas. Las plantas pueden absorber metales pesados a través de sus raíces, y estos metales pueden acumularse en diferentes partes de la planta, incluyendo las partes comestibles. La acumulación de metales en las plantas puede ser influenciada por la especie de la planta, la disponibilidad del metal en el suelo, y factores ambientales. Por ejemplo, los factores de translocación (TF), que es la relación del contenido de metales pesados en los órganos de los cultivos con el contenido de metales pesados en las raíces, pueden ser diferentes para distintos metales. Las plantas de hoja tienden a acumular más Hg, As y Zn que los cultivos de frutos y granos (Castañeda et al., 2025). La movilidad y la biodisponibilidad de los metales también influyen en el riesgo para la salud humana. La ingestión de metales pesados a través del consumo de alimentos contaminados o la exposición directa al suelo contaminado pueden causar graves problemas de salud. La evaluación de riesgos para la salud se puede hacer determinando la bioaccesibilidad de los metales (Xu et al., 2024). En la Figura 1 el suelo se representa en capas, con raíces de plantas que se extienden hacia abajo. El Cadmio (Cd) con flechas rojas gruesas que indican alta movilidad desde el suelo hacia raíces, tallos y granos, "Alta movilidad en suelos ácidos → absorción rápida por la planta → acumulación en granos, marcada con símbolos de peligro rojos". El Plomo (Pb) con flechas azules cortas que se detienen en las raíces, "Baja movilidad → retención en raíces (precipitación extracelular), indicado con iconos de candado." El Zinc (Zn) con flechas verdes continuas desde raíces hasta hojas, "Alta movilidad → acumulación en raíces y hojas". El Cobre (Cu) con flechas amarillas que llegan a las hojas, pero no a los granos, "Acumulación preferencial en hojas (no en granos)".

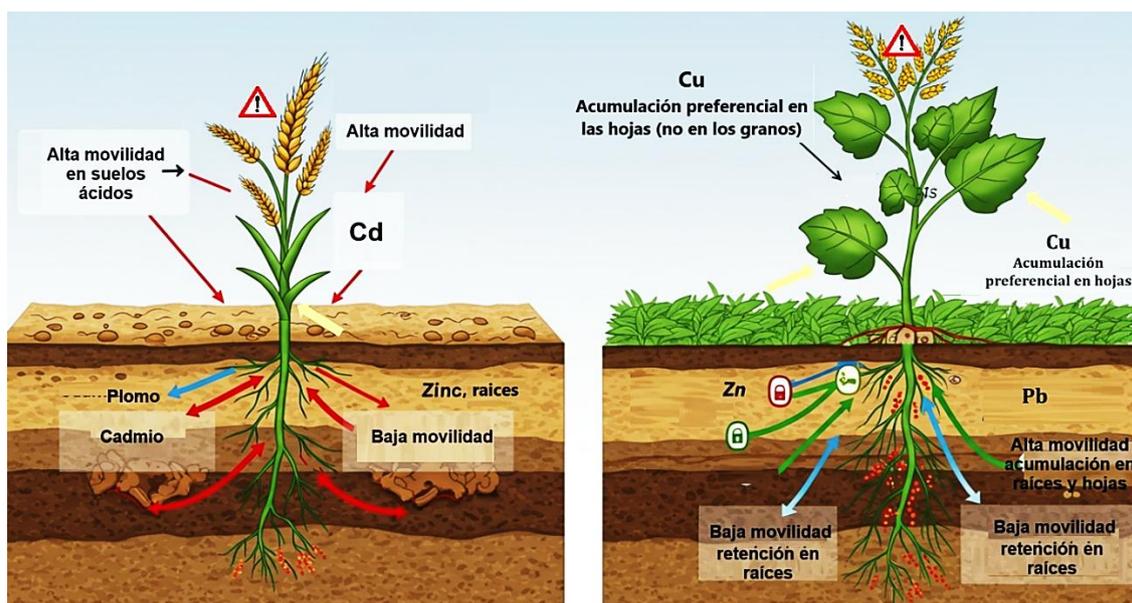


Figura 1. Diagrama en corte transversal de un suelo agrícola y una planta, que ilustra la movilidad y acumulación de metales pesados (Cd, Pb, Zn, Cu). Leyenda de colores de flechas: Rojo = Alta movilidad (Cd), Azul = Baja movilidad (Pb), Verde = Movilidad media-alta (Zn) y Amarillo = Movilidad selectiva (Cu). Símbolos: Triángulo rojo = Riesgo para la cadena alimentaria (granos con Cd). Candado = Retención en raíces (Pb).

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MOVILIDAD Y BIODISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS

pH del suelo

El pH es uno de los factores más importantes que controlan la movilidad de los metales. En suelos ácidos, la solubilidad y movilidad de metales como el Cd aumentan, ya que los iones de hidrógeno (H^+) compiten por los sitios de adsorción, liberando los metales a la solución del suelo. En contraste, en suelos con pH elevado, algunos metales pueden precipitar como hidróxidos o carbonatos, reduciendo su movilidad (Zhou et al., 2024).

Materia orgánica del suelo (MOS)

La MOS puede tanto aumentar como disminuir la movilidad de los metales. La MOS puede formar complejos con metales pesados, lo cual puede reducir su biodisponibilidad al inmovilizarlos. Sin embargo, la materia orgánica disuelta (MOD) también puede formar complejos solubles con metales, aumentando su movilidad (Wang et al., 2023).

Óxidos e hidróxidos de hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn)

Estos compuestos pueden adsorber metales pesados, disminuyendo su movilidad y biodisponibilidad. La reducción de estos óxidos puede liberar los metales previamente adsorbidos, incrementando su movilidad (Yang et al., 2024).

Textura del suelo

La textura del suelo, es decir, la proporción de arena, limo y arcilla afecta la movilidad de los metales. Los suelos con mayor contenido de arcilla y materia orgánica tienden a retener más metales, reduciendo su movilidad, mientras que los suelos arenosos permiten un mayor movimiento de metales. Las partículas finas, debido a su gran superficie específica, actúan como importantes captadores de metales pesados, aumentando su bioaccesibilidad (Liu et al., 2024).

Presencia de otros iones

La presencia de otros iones en la solución del suelo puede competir con los metales pesados por los sitios de adsorción, afectando su movilidad. Aniones como sulfatos, fosfatos y cloruros pueden aumentar la desorción de los metales al competir por los sitios de unión en el suelo (Chen et al., 2024).

Actividad biológica

Los microorganismos pueden liberar ácidos orgánicos o sideróforos que facilitan la desorción de metales, mientras que otros pueden inmovilizarlos (Hu et al., 2024).

Especies químicas de los metales

Los metales pueden existir en diferentes formas químicas, algunas de las cuales son más móviles y biodisponibles que otras. Por ejemplo, el Cr en su forma hexavalente (Cr(VI)) es más móvil y tóxico que el Cr(III). La biodisponibilidad del Pb en el suelo es alta debido a su movilidad y absorción en las plantas (Castañeda et al., 2025).

Procesos de adsorción y desorción

La adsorción inmoviliza los metales, mientras que la desorción los libera al medio, aumentando su movilidad y biodisponibilidad. La desorción se ve afectada por el pH, el potencial redox, y la presencia de aniones (Liu et al., 2024).

En la Figura 2 se presenta un esquema conceptual sobre la interacción de metales pesados (Pb, Cd, Hg y As) en el suelo, mostrando sus fases: no adsorbida (Fn), adsorbida (Gn), índice de precipitación (PI), oxidación mineral (OnM) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Estos componentes explican cómo las propiedades del suelo afectan la movilidad, disponibilidad y toxicidad de los metales, facilitando su comprensión ambiental y

edáfica. Se tiene la sección: a) Muestra cómo se distribuyen y se comportan los metales pesados dentro del sistema suelo b) Especifica cómo las

características del suelo (como el pH y la CIC) influyen en la retención, movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados.

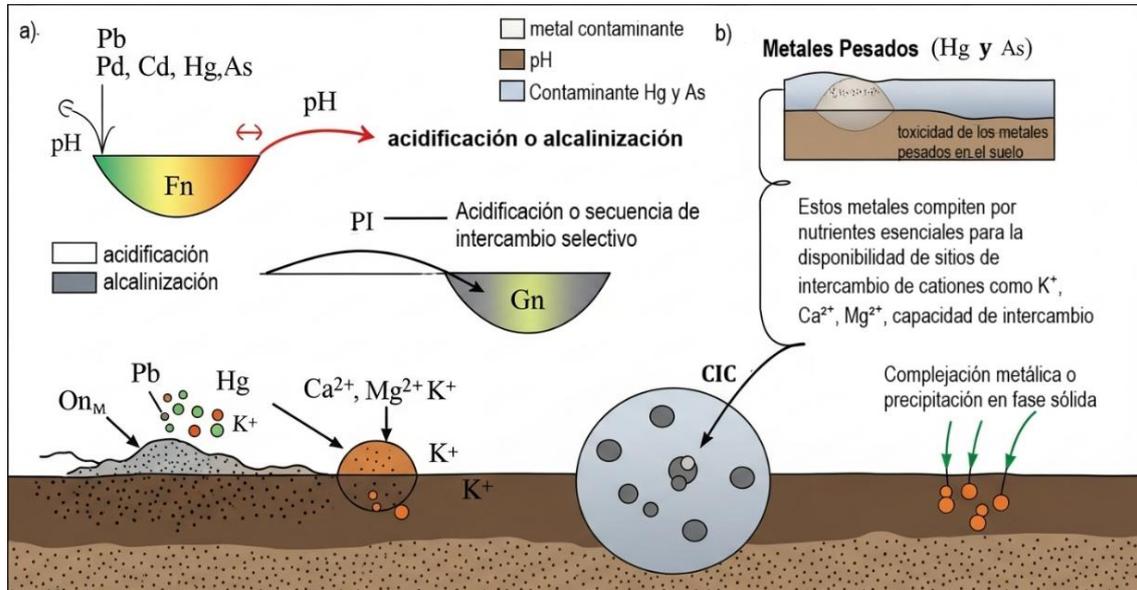


Figura 2. Esquema conceptual de las interacciones de los metales pesados en el suelo: fases, procesos y propiedades edáficas clave.

MOVILIDAD Y BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS MÁS COMUNES EN SUELOS AGRÍCOLAS

Cadmio (Cd)

La movilidad y biodisponibilidad del Cd en el suelo están determinadas por diversos factores que influyen en su absorción por las plantas. El pH juega un papel crucial, ya que en suelos ácidos el Cd es más soluble y, por lo tanto, más accesible para las plantas. La materia orgánica puede tanto inmovilizar el Cd al formar complejos como liberarlo, dependiendo de su origen. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) también incide en la retención del Cd, limitando su movilidad en suelos con alta CIC. Además, la competencia con otros iones, como calcio y zinc, puede afectar su absorción en las raíces. Por último, la textura del suelo influye en su retención, con suelos arcillosos limitando su movilidad y suelos arenosos favoreciendo su desplazamiento (Chen et al., 2024).

Plomo (Pb)

La movilidad y biodisponibilidad del Pb en suelos agrícolas son limitadas en comparación con otros metales pesados, pero su presencia sigue representando un riesgo ambiental y para la salud humana. Factores como el pH del suelo, la materia orgánica y la CIC influyen en su retención y disponibilidad. En suelos neutros o alcalinos, la movilidad del Pb es baja, mientras que en condiciones ácidas puede aumentar ligeramente. La materia orgánica y la CIC contribuyen a su inmovilización, aunque la descomposición de la materia orgánica podría liberar pequeñas cantidades de Pb. Además, la textura del suelo juega un papel importante, con suelos arcillosos reteniendo más Pb que los arenosos. La forma química del plomo también influye en su

biodisponibilidad, siendo más accesible cuando proviene de fuentes antropogénicas (Tang et al., 2024).

Cromo (Cr)

La movilidad y biodisponibilidad del Cr en suelos agrícolas dependen principalmente de su forma química y de las condiciones del suelo. El Cr(III) es la forma más estable y menos móvil, ya que tiende a formar compuestos insolubles y adsorberse a partículas del suelo. En contraste, el Cr(VI) es altamente soluble y móvil, lo que facilita su absorción por las plantas, aunque en suelos con alta materia orgánica suele reducirse a Cr(III), disminuyendo su toxicidad y movilidad. Factores como el pH, la materia orgánica y el potencial redox influyen en la transformación entre ambas formas, con suelos ácidos y de textura arenosa favoreciendo una mayor movilidad del Cr. Además, la competencia con otros iones puede afectar su adsorción en el suelo. Estos aspectos son clave para comprender el comportamiento del cromo en el ambiente y su impacto en la seguridad agrícola y ambiental (Mfopou et al., 2024).

Arsénico (As)

La movilidad y biodisponibilidad del arsénico (As) en suelos agrícolas dependen de su forma química y de diversas condiciones del suelo. El As(V) es la forma más estable y menos móvil, ya que tiende a adsorberse a los óxidos de hierro, mientras que el As(III) es más móvil, tóxico y biodisponible, representando un mayor riesgo para las plantas y la salud humana. Factores como el pH, la materia orgánica, la textura del suelo y el potencial redox

influyen en la movilidad del As, con suelos ácidos y reductores favoreciendo su desplazamiento. La presencia de otros aniones puede competir con el As por los sitios de adsorción, afectando su retención en el suelo (Wang et al., 2023).

Mercurio (Hg)

La movilidad y biodisponibilidad del Hg en suelos agrícolas dependen de su forma química y de diversos factores ambientales. Mientras que el mercurio elemental (Hg^0) es relativamente inmóvil y puede volatilizarse, el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) puede adsorberse a partículas del suelo, limitando su movilidad. Sin embargo, la mayor preocupación es el metilmercurio (MeHg), la forma más tóxica y biodisponible, que se forma a través de la actividad microbiana y puede acumularse en la cadena alimentaria. Factores como el pH, la materia orgánica, el potencial redox y la presencia de ciertos minerales influyen en la transformación y movilidad del Hg en el suelo. En particular, las condiciones reductoras favorecen la metilación del Hg, aumentando su toxicidad (Rai et al., 2019).

Cobre (Cu)

La movilidad y biodisponibilidad del Cu en suelos agrícolas dependen de su forma química y de diversos factores ambientales. Aunque es un micronutriente esencial para las plantas, en concentraciones elevadas puede volverse tóxico y acumularse en la cadena alimentaria. Su forma más biodisponible es el Cu^{2+} , mientras que cuando está unido a la materia orgánica o adsorbido en minerales como óxidos de hierro y arcillas, su movilidad tiende a reducirse. Factores como el pH del suelo, la materia orgánica, los minerales presentes y el potencial redox influyen en su disponibilidad, siendo mayor en suelos ácidos y bajo condiciones oxidantes. Además, la interacción con otros metales, como el hierro, puede afectar su absorción (Xu et al., 2024).

Zinc (Zn)

La movilidad y biodisponibilidad del Zn en suelos agrícolas representan un equilibrio crítico entre su función como micronutriente esencial para las plantas y su potencial toxicidad en exceso. La dinámica del zinc está determinada por su forma química en el suelo, destacándose el Zn^{2+} (iónico) como la forma más móvil y biodisponible, mientras que su asociación con materia orgánica, minerales como óxidos de hierro o arcillas, y su presencia en fertilizantes modulan su disponibilidad. Factores como el pH del suelo (con mayor solubilidad en medios ácidos), la materia orgánica (capaz de formar complejos que aumentan o reducen su movilidad), la presencia de minerales adsorbentes (óxidos de hierro y manganeso), la interacción con otros elementos (como el hierro) y la actividad microbiana (que puede movilizar o inmovilizar el Zn) influyen en su comportamiento ambiental (Sun et al., 2023).

Níquel (Ni)

La movilidad y biodisponibilidad del Ni en suelos agrícolas representan un desafío crítico debido a su toxicidad potencial y capacidad de acumulación en la cadena alimentaria. Su comportamiento en el suelo está determinado por su forma química: el Ni^{2+} (iónico) destaca como la especie más móvil y biodisponible, mientras que su asociación con materia orgánica, óxidos de hierro, arcillas, minerales del suelo o su llegada por sedimentación atmosférica modulan su disponibilidad. Factores clave como el pH del suelo (mayor solubilidad en condiciones ácidas), la materia orgánica (que forma complejos variables), la presencia de minerales adsorbentes (óxidos de hierro, manganeso y arcillas) y la interacción con otros elementos influyen en su dinámica ambiental. Aunque la actividad microbiana podría desempeñar un papel en el ciclo del níquel, aún se requieren estudios más profundos para comprender su impacto (Rai et al., 2019).

EFFECTOS DE LOS METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

Los metales pesados en suelos agrícolas tienen efectos perjudiciales que se pueden agrupar en: toxicidad para los microorganismos del suelo, acumulación en cultivos y riesgo para la cadena alimentaria, y degradación de la calidad del suelo y reducción de la productividad agrícola (Wei et al., 2023).

Toxicidad para microorganismos del suelo

La toxicidad causada por metales pesados en los microorganismos del suelo representa un problema significativo debido a su impacto en la salud y funcionalidad del ecosistema. La presencia de estos contaminantes reduce la diversidad y abundancia de microorganismos, afectando la composición de las comunidades microbianas. Las exposiciones prolongadas a concentraciones elevadas de metales generan estrés en estos organismos, disminuyendo la riqueza de especies y promoviendo un cambio hacia comunidades dominadas por microorganismos tolerantes a los metales (Hu et al., 2024).

Acumulación en cultivos y riesgo para la cadena alimentaria

La acumulación de metales pesados en cultivos representa un grave riesgo para la cadena alimentaria, ya que estos contaminantes pueden concentrarse en las partes comestibles de las plantas, afectando la salud humana y animal. Los metales ingresan a los cultivos principalmente a través de las raíces, aunque también pueden acumularse por deposición atmosférica. La acumulación varía según la especie vegetal, la disponibilidad del metal en el suelo y factores ambientales, siendo los cultivos de hoja verde especialmente propensos a acumular metales como mercurio y arsénico (Rai et al., 2019; Yu et al., 2024).

Degradación de la calidad del suelo y reducción de la productividad agrícola

La acumulación de metales pesados en el suelo degrada su calidad y afecta negativamente la productividad agrícola. Estos metales alteran la

estructura, fertilidad y capacidad del suelo para sustentar la vida vegetal al inhibir la actividad enzimática, afectar el ciclo de nutrientes y reducir su disponibilidad para las plantas. Como consecuencia, disminuyen la germinación de semillas, el crecimiento de raíces y la actividad metabólica de las plantas, lo que reduce tanto los rendimientos agrícolas como la calidad de los cultivos (Li et al., 2024).

Además, los metales pesados provocan la pérdida de nutrientes esenciales y disminuyen la actividad biológica del suelo, afectando organismos benefi-

ciosos como lombrices y bacterias. También alteran propiedades fisicoquímicas como el pH y la capacidad de intercambio catiónico, lo que reduce la movilidad de los nutrientes y agrava la contaminación. Fuentes como abonos orgánicos, fertilizantes químicos y pesticidas contribuyen a esta problemática, ya que pueden contener metales como cobre, zinc y arsénico, acumulándose con su uso prolongado (Tomczyk et al., 2023).

En la Tabla 2 se presenta una descripción de los efectos de los metales pesados en los suelos agrícolas.

Tabla 2
Efectos de los metales pesados en suelos agrícolas

Efecto de los metales pesados	Descripción	Fuentes
Toxicidad para microorganismos del suelo	<ul style="list-style-type: none"> Estos metales pueden alterar los procesos microbianos y las interacciones suelo-microbios. La toxicidad de metales como el cadmio (Cd) puede afectar la actividad de los microorganismos en el suelo. Afectan la actividad de las enzimas del suelo. 	Dong et al. (2023). Hu et al. (2024).
Acumulación en cultivos y riesgo para la cadena alimentaria	<ul style="list-style-type: none"> La ingestión de vegetales contaminados puede causar problemas de salud como cáncer gastrointestinal, mecanismos inmunológicos frágiles, retraso en el crecimiento mental y malnutrición. Metales como el arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr), cobre (Cu) y níquel (Ni) son de particular preocupación debido a su alta toxicidad. La acumulación varía según la especie vegetal y la disponibilidad del metal en el suelo. El factor de bioconcentración (BCF) es un parámetro importante para la transferencia de metales pesados del suelo a las plantas. El factor de transferencia (TF) es otro criterio importante para evaluar los riesgos para la salud humana relacionados con la ingestión de cultivos contaminados. El TF es un bioindicador del nivel de metales pesados en el suelo, y predice la absorción de los metales por los productos agrícolas. Los metales como el zinc (Zn) y el cobre (Cu), que juegan un papel en el sistema inmunológico animal y la producción, pueden acumularse en el estiércol y luego en el suelo. 	Anaya et al. (2022); Aslam et al. (2024); Mfopou et al. (2024).
Degradación de la calidad del suelo y reducción de la productividad agrícola	<ul style="list-style-type: none"> La acumulación de metales pesados puede degradar la calidad del suelo, afectando su estructura, fertilidad y capacidad para sustentar la vida vegetal. La contaminación por metales pesados puede provocar la pérdida de nutrientes esenciales y alterar el pH del suelo. La toxicidad de los metales puede reducir la germinación de las semillas, el crecimiento de las raíces, la actividad metabólica de las plantas y, en consecuencia, la producción agrícola. Metales como el plomo (Pb) pueden inhibir organismos beneficiosos del suelo. El uso continuo de estiércol puede llevar a la acumulación de metales pesados en el suelo, superando los límites nacionales. La acumulación de metales pesados puede reducir la resistencia y resiliencia de las redes tróficas del suelo ante la sequía. 	Rai et al. (2019); Anaya et al. (2022); Dong et al. (2023); Liu et al. (2023); Sun et al. (2023); Hu et al. (2024).

MODELOS DE EVALUACIÓN DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

La evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas requiere herramientas especializadas que permitan identificar su impacto y gestionar los riesgos asociados de manera eficaz. Entre los modelos más destacados se encuentran los índices y métodos diseñados para analizar tanto los niveles de contaminación como los riesgos para la salud humana (Upadhyay et al., 2024). El Índice Geoacumulativo (Igeo) y el Factor de Enriquecimiento (EF) son los métodos más amplia-

mente utilizados en estudios sobre suelos agrícolas, ya que facilitan la evaluación del grado de contaminación y la identificación de posibles fuentes de origen. Estos índices ofrecen información fundamental para comprender la dinámica de los metales pesados en los ecosistemas agrícolas (Tomczyk et al., 2023). Sin embargo, el Índice de Riesgo Ecológico (ER) resulta menos adecuado en este contexto, ya que considera un número limitado de elementos y utiliza coeficientes de toxicidad

predefinidos que podrían no reflejar con precisión las condiciones locales. Por su parte, el modelo de evaluación del riesgo a la salud humana representa un enfoque robusto para cuantificar los peligros asociados con los metales pesados en suelos agrícolas (Wei et al., 2023). En el manejo de suelos agrícolas contaminados, la combinación de estos

modelos permite una visión más integral de la contaminación y de los riesgos asociados para la salud (Liu et al., 2025).

En la Tabla 3 se muestran las principales ventajas y limitaciones de los modelos de evaluación de contaminación por metales pesados.

Tabla 3
Modelos de evaluación de contaminación por metales pesados: ventajas y limitaciones

Modelo de evaluación	Metales considerados	Ventajas	Limitaciones	Fuentes
Índice de Geoacumulación (Igeo): Compara la concentración del metal en la muestra con un valor de fondo o referencia, ajustado por un factor de 1,5 para tener en cuenta variaciones naturales o artificiales.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V	Clasifica el nivel de contaminación en varias categorías, desde no contaminado hasta extremadamente contaminado. Es uno de los indicadores más utilizados. Considera la variabilidad natural de los metales en el suelo.	La selección del valor de fondo es crucial y puede variar según la región. La clasificación puede diferir ligeramente entre estudios.	Tomczyk et al. (2023) Xu et al. (2024) Wei et al. (2023) Zhang et al. (2023) Wu et al. (2024)
Índice de Enriquecimiento (EF): Compara la concentración de un metal con un elemento de referencia (generalmente un elemento conservativo en la corteza terrestre) para evaluar el grado de enriquecimiento por actividades humanas.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V.	Útil para identificar fuentes antropogénicas de contaminación. Es uno de los indicadores más utilizados y universales. Su clasificación permite una evaluación más precisa de la contaminación.	La selección del elemento de referencia es importante y puede influir en los resultados. No tiene en cuenta la toxicidad de los metales.	Tomczyk et al. (2023). Liu et al. (2025) Rai et al. (2019)
Índice de Riesgo Ecológico Potencial (ER): Evalúa el riesgo ecológico potencial combinando el factor de contaminación (CF) con un factor de toxicidad específico para cada metal.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Considera la toxicidad de cada metal. Permite identificar metales que representan mayor peligro para el ecosistema. Es útil para evaluar el riesgo de los metales en la ecología.	No incluye todos los metales en el cálculo. Los factores de toxicidad son predeterminados y no consideran variaciones en la toxicidad. No representa los efectos biológicos de los metales.	Wei et al. (2023) Chen et al. (2024) Dong et al. (2023) Li et al. (2024)
Modelos de evaluación de riesgo a la salud: Calculan la exposición a metales pesados a través de diferentes rutas (ingestión, inhalación, contacto dérmico) y el riesgo para la salud (no cancerígeno y cancerígeno).	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Fe, As, Hg y otros metales que se encuentren en el área de estudio.	Permiten estimar el riesgo para la salud humana asociado a la exposición a metales pesados. Se pueden realizar simulaciones de Monte Carlo para incorporar incertidumbre en la evaluación.	Requieren datos específicos sobre parámetros de exposición que pueden ser difíciles de obtener. La precisión de los resultados depende de la calidad de los datos y los parámetros empleados.	Upadhyay, Kumar & Kumari (2024) Wei et al. (2023) Liu et al. (2025).
Factor de Contaminación (CF): Calcula la razón entre la concentración de un metal en una muestra y su valor de fondo.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V	Fácil de calcular e interpretar. Puede usarse para evaluar el aporte de cada metal a la contaminación total.	No considera la toxicidad de los metales. Su clasificación es simple (cuatro clases) comparado con otros índices.	Tomczyk et al. (2023) Wei et al. (2023) Rai et al. (2019)
Índice de Polución (PI): Calcula la razón entre la concentración del metal en la muestra y un estándar de calidad ambiental. Puede calcularse para un solo metal o para varios en conjunto.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V.	Fácil de calcular y entender. Permite comparar la contaminación con los estándares de calidad. Puede indicar la ausencia o baja contaminación.	No considera la toxicidad de los metales. Puede sobreestimar el riesgo si no se ajusta a las condiciones locales.	Tomczyk et al. (2023) Jing et al. (2023) Yu et al. (2024) Yang et al. (2024)
Índice de Polución de Nemerow (NPI): Combina el valor máximo y promedio del índice de polución (PI) para cada metal para obtener un valor compuesto de contaminación.	Generalmente incluye: Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V.	Permite tener una visión más completa de la contaminación al combinar los valores máximo y promedio.	Su interpretación puede ser más compleja. Su estandarización y comparación entre diferentes estudios es difícil.	Tomczyk et al. (2023) Yu et al. (2024) Li et al. (2024)
Índice de Riesgo Ecológico (RI): Calcula el riesgo ecológico potencial sumando los riesgos individuales (Ei) de	Generalmente incluye: As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn	Permite evaluar el riesgo ecológico global de todos los metales en conjunto. Facilita la identificación	Los factores de toxicidad son predeterminados y no consideran variaciones en la toxicidad. Puede ser menos	Wei et al. (2023) Jing et al. (2023) Rai et al. (2019) Liu et al. (2025)

cada metal. Combina la concentración del metal con un factor de toxicidad.	de metales que contribuyen en mayor medida al riesgo.	precisa en áreas con baja contaminación generalizada y contaminación localizada por algunos metales.	
Índice de Polución de un Solo Factor (SFPI): Calcula la razón entre la concentración de un metal en la muestra y un estándar de calidad ambiental o un valor de referencia específico.	Variable, dependiendo del estudio.	Fácil de calcular y usar para evaluar el nivel de contaminación para cada metal individualmente.	No evalúa el riesgo combinado de varios metales.
Índice de Carga de Polución (PLI): Calcula la raíz n-ésima del producto de los factores de contaminación (CF) de los metales analizados.	Variable, dependiendo del estudio.	Útil para evaluar la contaminación combinada de varios metales. Permite tener una idea general del nivel de contaminación del suelo.	No tiene en cuenta la toxicidad específica de cada metal.
			Tomczyk et al. (2023) Jing et al. (2023) Dong et al. (2023). Wei et al. (2023) Jing et al. (2023) Rai et al. (2019).

IMPLICANCIAS PARA LA GESTIÓN Y LAS POLÍTICAS RELACIONADAS CON LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

Muchos estudios proporcionan varias implicaciones importantes para la gestión y las políticas relacionadas con la contaminación por metales pesados en suelos.

Evaluación integral y contextualizada

La elección de índices para evaluar la contaminación por metales pesados debe adaptarse al contexto local, teniendo en cuenta factores como el objetivo del estudio, la disponibilidad de datos, el tipo de suelo y el uso de la tierra. Es fundamental no basarse en un solo indicador, sino combinar varios para obtener una evaluación más precisa y completa. Este enfoque moderno, que integra múltiples indicadores, permite comprender mejor la contaminación y desarrollar estrategias de gestión más efectivas (Rehman et al., 2023; Tomczyk et al., 2023).

Priorización de áreas y metales contaminantes

La contaminación por metales pesados no es uniforme, sino que varía según la ubicación y las características del suelo. Por ello, es crucial identificar las áreas más afectadas y los metales que representan mayor riesgo para enfocar los esfuerzos de gestión y remediación. Por ejemplo, en Polonia, las actividades industriales en regiones como Alta Silesia y Baja Silesia han generado toxicidad en puntos específicos, afectando principalmente suelos como los cambisoles y feozems. En China, el Cd es el principal contaminante, mientras que otros metales como Cr, Zn, Pb, Cu y Ni tienen un impacto significativo en los índices de contaminación (PI). En contraste, elementos como V y Co tienen una influencia menor (Li et al., 2024).

Monitoreo continuo y específico

Dado que las fuentes de contaminación son complejas y pueden variar con el tiempo, el monitoreo constante es esencial. Es necesario integrar datos obtenidos en campo con otras fuentes para mejorar la precisión y establecer sistemas que permitan evaluar la evolución de la contaminación y la efectividad de las medidas de

gestión. Además, el monitoreo debe ser lo más localizado posible para reflejar con exactitud las condiciones específicas de cada área (Lian et al., 2022; Chen et al., 2023).

Regulación y control de fuentes contaminantes

Las actividades industriales, el transporte y las prácticas agrícolas intensivas son las principales fuentes de contaminación por metales pesados. Por ello, es imprescindible implementar regulaciones más estrictas y controles efectivos para reducir las emisiones. Esto incluye el uso de tecnologías limpias y prácticas agrícolas sostenibles, además de establecer medidas específicas para controlar las concentraciones de metales en terrenos agrícolas. En el caso de China, las actividades industriales y de transporte se identifican como los mayores contribuyentes al riesgo ecológico, con el cadmio como principal contaminante (Lei et al., 2022; Upadhyay, Kumar & Kumari, 2024).

Riesgo para la salud humana

El consumo de alimentos cultivados en suelos contaminados representa un riesgo significativo para la salud, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños. Evaluar estos riesgos es fundamental para entender el impacto de la contaminación en la población. Se deben desarrollar estrategias que minimicen la exposición, enfocándose en reducir los niveles de metales pesados en alimentos. Según los estudios, la ingesta de alimentos contaminados es una de las principales vías de exposición que debe incluirse en cualquier evaluación de riesgos (Batool et al., 2023).

Medidas de remediación y prevención

Las investigaciones han sugerido que el uso de nanomateriales puede ser una solución prometedora para reducir la acumulación de metales pesados en cultivos. Estos materiales no solo disminuyen la biodisponibilidad de los metales en el suelo, sino que también pueden mejorar la biomasa de los cultivos. A largo plazo, las medidas deben centrarse en prevenir la

contaminación del suelo y limitar la exposición humana mediante una gestión adecuada de las fuentes agrícolas, industriales y de transporte (Chen et al., 2024; Wahab et al., 2024).

Colaboración intersectorial

La integración entre tomadores de decisiones, industrias y comunidades locales es fundamental

para abordar la contaminación de manera efectiva. Los resultados de los estudios deben utilizarse como base para desarrollar estrategias de gestión de riesgos y planes de acción, especialmente en áreas postindustriales. Además, las políticas deben estar orientadas a promover un desarrollo sostenible y saludable (Fu et al., 2022; Wei et al., 2023).

CONCLUSIONES

La movilidad de los metales pesados en suelos agrícolas es compleja y depende de la interacción de múltiples factores edáficos y ambientales. La comprensión de estas interacciones es crucial para gestionar los riesgos asociados con la contaminación por metales pesados y desarrollar estrategias de remediación efectivas.

La movilidad de metales pesados en suelos agrícolas está influenciada por diversas propiedades edáficas, lo que afecta su disponibilidad para las plantas.

El pH del suelo es un factor crucial en la movilidad de los metales pesados. En suelos ácidos, metales como el Cd tienden a ser más solubles, aumentando su biodisponibilidad y, por lo tanto, su captación por las raíces de las plantas. En contraste, el Cr presenta una movilidad compleja, siendo el Cr(VI) más soluble que el Cr(III), aunque este último es más común en suelos naturales.

La materia orgánica en el suelo juega un papel importante en la movilidad de los metales pesados. La materia orgánica puede reducir la biodisponibilidad de metales pesados como el cromo, particularmente en su forma Cr(VI), ya que favorece su reducción a Cr(III). Sin embargo, la materia orgánica también puede ser una fuente de metales como el cobre (Cu) y el zinc (Zn), cuando se aplican fertilizantes orgánicos como estiércol.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo afecta la disponibilidad de metales pesados. La CIC es la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes, incluyendo metales pesados. Suelos con alta CIC pueden retener más metales, reduciendo su movilidad.

La presencia de otros iones puede competir con los metales pesados por los sitios de absorción en las plantas. Esto puede influir en la captación de metales específicos como el Cd, el cual puede entrar a las raíces a través de canales de Ca y Zn.

La textura del suelo también puede influir en la movilidad de los metales. Los metales pueden ser retenidos por arcillas y materia orgánica, lo que reduce su movilidad. Suelos arenosos pueden tener mayor movilidad de metales pesados comparados con suelos arcillosos.

El contenido de humedad en el suelo puede influir en la movilidad de metales pesados, especialmente en el caso del Hg. En suelos inundados o con alta humedad, las especies de Hg pueden ser principalmente insolubles, limitando su absorción por las plantas.

La presencia de ciertos nutrientes en el suelo puede afectar la acumulación de metales. Así, en el caso del arroz, el contenido de nitrógeno (N) y fósforo (P) en el suelo puede estar relacionado negativamente con la acumulación de Cu y Cd.

La forma química de los metales pesados en el suelo determina su movilidad y biodisponibilidad. Metales provenientes de actividades humanas tienden a ser más biodisponibles.

La movilidad de los metales pesados en las plantas varía significativamente según el elemento. El Pb presenta baja movilidad y tiende a acumularse en las raíces debido a su interacción con la pared celular y su precipitación extracelular. En contraste, el Zn es altamente móvil y puede distribuirse tanto en las raíces como en las hojas. Por su parte, el Cu muestra una mayor acumulación en las hojas en comparación con los granos. Estos patrones de movilidad influyen en la absorción y distribución de los metales dentro de las plantas, con implicaciones en su toxicidad y biodisponibilidad.

Las actividades humanas, tanto en la agricultura como en la industria, desempeñan un papel importante en la acumulación de metales pesados en los suelos. En el sector agrícola, el uso de fertilizantes y estiércoles puede aumentar la concentración de elementos como el Cu y el Zn. Por su parte, procesos industriales como la minería y la fundición generan contaminación a través de la deposición atmosférica y otros mecanismos. Debido a estos impactos, es fundamental adoptar estrategias de manejo sostenible para reducir la contaminación del suelo y minimizar sus efectos en los ecosistemas y la salud humana.

Es fundamental orientar estudios futuros hacia el desarrollo de modelos predictivos, con la finalidad de comprender la dinámica de los metales pesados en diversos tipos de suelo. Asimismo, se requiere realizar una evaluación a largo plazo de diversas técnicas de biorremediación para validar su eficacia y sostenibilidad en diferentes condiciones ambientales. Por otro lado, resultará crucial estudiar el impacto combinado del cambio climático y las prácticas agrícolas sobre la movilidad de estos contaminantes, a fin de implementar estrategias de manejo más efectivas y adaptadas al contexto actual. Estas líneas de investigación contribuirían significativamente al control de la contaminación y a la protección del recurso suelo y agua en zonas agrícolas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya, M. A., Rangel, F. M., Iannacone, J. A., & Romero, L. M. (2022). Metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales: Una revisión sistemática. *Idezia (Arica)*, 40(3), 33–41. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300033>
- Aslam, M. A., Abbas, M. S., Mustaqeem, M., Bashir, M., Shabbir, A., Saeed, M. T., & Irfan, R. M. (2024). Comprehensive assessment of heavy metal contamination in soil-plant systems and health risks from wastewater-irrigated vegetables. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 2, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2024.100044>
- Batool, F., Hussain, M. I., Nazar, S., Bashir, H., Khan, Z. I., Ahmad, K., Alnuwaiser, M. A., & Yang, H.-H. (2023). Potential of sewage irrigation for heavy metal contamination in soil-wheat grain system: Ecological risk and environmental fate. *Agricultural Water Management*, 278, 108144. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108144>
- Castañeda, M., Gallego, S. E., Avila, B. S., & Peñuela, G. A. (2025). Levels of heavy metals in tropical fruits and soils from agricultural areas of La Union, Antioquia, Colombia: health risk assessment. *Food and Humanity*, 4, 100503. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100503>
- Chen, D., Yang, S., Jiang, Z., Wang, Z., Wang, Z., & Tian, H. (2023). Spatial distribution, ecological risk and health risk assessment of heavy metals in the Ankang Basin, China. *Heliyon*, 9(12), e22580. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22580>
- Chen, L., Fang, L., Tan, W., Bing, H., Zeng, Y., Chen, X., ... & Xing, B. (2024). Nano-enabled strategies to promote safe crop production in heavy metal (loid)-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 947, 174505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174505>
- Dong, Q., Wen, H., Wang, P., Zhang, D., & Yan, M. (2023). Health risk assessment of heavy metals in soils and crops in a mining area of the southwest Nanyang Basin, China. *China Geology*, 6(4), 567-579. <https://doi.org/10.31035/cg2023062>
- Fu, H., Tan, P., Wang, R., Li, S., Liu, H., Yang, Y., & Wu, Z. (2022). Advances in organophosphorus pesticides pollution: Current status and challenges in ecotoxicological, sustainable agriculture, and degradation strategies. *Journal of Hazardous Materials*, 424 (Part B), 127494. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127494>
- Hu, H., Feng, Z., Zhou, W., & Liu, X. (2025). Machine learning combined with geodetector to predict the spatial distribution of heavy metals in soil. *Science of The Total Environment*, 959, 178281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178281>
- Hu, H., Qu, L., Tao, S., & Zhang, N. (2024). Differential effects of urbanization-induced heavy metal pollution on soil microbial communities under evergreen and deciduous trees. *Pedobiologia*, 107, 150999. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150999>
- Hu, N.-W., Yu, H.-W., Deng, B.-L., Hu, B., Zhu, G.-P., Yang, X.-T., ... & Wang, Q.-Y. (2023). Levels of heavy metal in soil and vegetable and associated health risk in peri-urban areas across China: A meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 259, 115037. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115037>
- Jing, G., Wang, W., Chen, Z., Huang, B., Li, Y., Zhang, Y., Yang, Y., Lu, Q., Zhang, Z., & Imran, M. (2023). Ecological risks of heavy metals in soil under different cultivation systems in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348, 108428. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108428>
- Lei, M., Li, K., Guo, G., & Ju, T. (2022). Source-specific health risks apportionment of soil potential toxicity elements combining multiple receptor models with Monte Carlo simulation. *Science of The Total Environment*, 817, 152899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152899>
- Lian, Z., Zhao, X., Gu, X., Li, X., Luan, M., & Yu, M. (2022). Presence, sources, and risk assessment of heavy metals in the upland soils of northern China using Monte Carlo simulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 230, 113154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113154>
- Li, J., Li, X., Wang, C., Liu, J.-Z., Gao, Z.-D., Li, K.-M., ... & Zang, F. (2024). Pollution characteristics and probabilistic risk assessment of heavy metal(loid)s in agricultural soils across the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 167, 112676. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112676>
- Li, R., Wang, J., Zhou, Y., Zhang, W., Feng, D., & Su, X. (2023). Heavy metal contamination in Shanghai agricultural soil. *Heliyon*, 9(12), e22824. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22824>
- Li, X., Pan, Y., Zhu, C., Tang, L., Bai, Z., Liu, Y., ... & Gao, B. (2024). Priority areas identification for arable soil pollution prevention based on the accumulative risk of heavy metals. *Science of the Total Environment*, 954, 176440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176440>
- Liu, F., Yang, Z., Li, Q., & Li, T. (2023). Enrichment Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems. *KSCE Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-2459-9>
- Liu, J., Xu, J., Fan, Y., Song, Y., Zeng, J., & Li, L. (2024). Multiple-pathway exposure risks and driving factors of heavy metals in agricultural soil and crops near a metal smelting area. *Journal of Cleaner Production*, 459, 142523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142523>
- Liu, T., Jia, Z., Chen, L., Yu, Z., & Chen, B. (2025). Identification of the primary pollution sources and dominant influencing factors of heavy metals in agricultural soil using a genetic algorithm optimized random forest model. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 290, 117731. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117731>
- Liu, Y., Pan, B., Liu, M., He, L., & Chen, C. (2023). Uptake of heavy metals by crops near a mining field: Pathways and transfer factors. *Chemosphere*, 322, 138215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138215>
- Mfopou, Y. C., Tchakounte, M. B., Ndjioudjop, M. N., Zogo, A. U., Ngangue, A. F., Fankam, F. T., ... & Gonne, E. L. (2024). Evidence of heavy metal in soil, irrigation water and vegetables in a market garden area of Yaounde, Cameroon. *Scientific African*, 25, e02280. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02280>
- Musarrat Ramzan, M., Sarwar, S., Ahmad, M. Z., Ahmed, R. Z., Hussain, T., & Hussain, I. (2024). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil of Lyari River using bioenergy crops. *South African Journal of Botany*, 167, 663-670. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.02.034>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Brown, R. J., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and remediation. *Environment international*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.0681>
- Rehman, Z., Junaid, M. F., Ijaz, N., Khalid, U., & Ijaz, Z. (2023). Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints. *Science of The Total Environment*, 867, 161468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161468>
- Sun, W., Ye, J., Lin, H., Yu, Q., Wang, Q., Chen, Z., & Ma, J. (2023). Dynamic characteristics of heavy metal accumulation in agricultural soils under long-term fertilization. *Chemosphere*, 335, 139051. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139051>
- Tang, H., Deng, Q., Yuan, Y., Zhang, S., Luo, Y., Chen, Y., ... & Huang, Y. (2024). The spatial distribution and source of heavy metals in soil, plant, and atmospheric dust in the Jiyuan area, China. *Ore and Energy Resource Geology*, 17, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.orege.2024.100059>
- Tomczyk, P., Wdowczyk, A., Wiatkowska, B., & Szymańska-Pulikowska, A. (2023). Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators. *Ecological Indicators*, 156, 111161. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111161>
- Upadhyay, V., Kumar, S., & Kumari, A. (2024). From soil to health hazards: Heavy metals contamination in northern India. *Chemosphere*, 354, 141697. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141697>
- Wahab, A., Muhammad, M., Ullah, S., Abdi, G., Shah, G. M., Zaman, W., & Ayaz, A. (2024). Agriculture and environmental management through nanotechnology: Eco-friendly nanomaterial synthesis for soil-plant systems, food safety, and sustainability. *Science of The Total Environment*, 926, 171862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171862>
- Wang, C. C., Li, M. Y., Yan, C. A., Tian, W., Deng, Z. H., Wang, Z. X., ... & Xiang, P. (2023). Heavy metal (loid) s in agricultural soil from main grain production regions of China: bioaccessibility and health risks to humans. *Science of The Total Environment*, 858, 159819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159819>
- Wei, M., Yang, L., Liu, X., Feng, J., Zhang, Y., & Pan, A. (2023). Distribution characteristics, source analysis and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in central Shiquan County, China. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.049>
- Wu, P., Wang, J., Guo, Z., Cheng, Y., & Wu, J. (2024). Heavy metals and bacterial community determine resistance gene profiles in agricultural soils around mining area. *Applied Soil Ecology*, 202, 105581. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105581>
- Xu, S., Li, C., Wang, Y., Wu, A., Gao, G., & Zang, F. (2024). Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in a soil-wheat system of an arid oasis city in northwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271, 115958. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115958>
- Yang, E., Wang, Q., Zhang, Z., Shao, W., Luo, H., Xiao, X., ... & Guan, Q. (2024). Source-oriented health risk assessment of heavy metals in a soil-river continuum in northwest China. *International*

- Journal of Sediment Research*, 39, 916–928.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.09.001>
- Yang, S., Zhou, Q., Sun, L., Sun, Y., Qin, Q., Wang, J., ... & Xue, Y. (2024). Source to risk receptor transport and spatial hotspots of heavy metals pollution in peri-urban agricultural soils of the largest megacity in China. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135877. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135877>
- Yu, P., Shao, X., Wang, M., Zhu, Z., Tong, Z., Peng, J., Deng, Y., & Huang, Y. (2024). Effects of atmospheric deposition on heavy metal contamination in paddy field systems under different functional areas in ChangZhuTan, Hunan Province, China. *Science of the Total Environment*, 933, 172953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172953>
- Zhang, J., Peng, W., Lin, M., Liu, C., Chen, S., Wang, X., & Gui, H. (2023). Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coal-based cities: A case study of Suzhou City in Anhui Province, China. *Heliyon*, 9(4), e14841. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14841>
- Zhou, W., Yu, R., Guo, F., Shen, C., Liu, Y., & Huang, Y. (2024). Source apportionment and risk assessment of soil heavy metals in the Huangshui River Basin using a hybrid model. *Ecological Indicators*, 160, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111906>
- Zhu, Y., An, Y., Cheng, L., & Lv, S. (2024). Geochemical characteristics and health risks of heavy metals in farmland soils near a coal mine. *Environmental Research*, 241, 117670. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117670>