

Efecto de la contaminación por metales pesados en la seguridad alimentaria

Effect of heavy metal contamination on food security

Marcial Plaza Santos*
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
Universidad Nacional "Siglo XX"
Llallagua - Bolivia
plazamarcial04@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3757-4192>

*Correspondencia:
plazamarcial04@gmail.com

Cómo citar este artículo:
Plaza, M. (2026). Efecto de la contaminación por metales pesados en la seguridad alimentaria. *Esprint Investigación*, 5(Esp.1), 396-404. <https://doi.org/10.61347/ei.v5iEsp.1.329>

Recibido: 8 de mayo de 2026
Aceptado: 13 de junio de 2026
Publicado: 26 de junio de 2026

Resumen: La presente investigación se basó en una revisión bibliográfica sistemática siguiendo el protocolo PRISMA 2020, mediante la búsqueda, selección y análisis de estudios científicos publicados entre 2019 y 2026 en bases de datos académicas. El objetivo del estudio fue identificar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre la presencia de metales pesados en alimentos, sus fuentes de contaminación, su distribución en suelos, agua y cultivos, y su impacto en la seguridad alimentaria. Se destacó la influencia de actividades antropogénicas como la minería, la industria y el uso de agroquímicos, así como la aplicación de criterios de inclusión rigurosos para garantizar la calidad, confiabilidad y síntesis estructurada del conocimiento científico disponible. Los resultados evidencian que los metales pesados, especialmente cadmio, plomo, mercurio y arsénico, son elementos persistentes, bioacumulables y altamente tóxicos, que afectan la salud humana y los ecosistemas al transferirse a la cadena alimentaria. Sus concentraciones varían según las condiciones ambientales, geológicas y prácticas agrícolas, generando riesgos significativos como daño neurológico, renal, inmunológico y genético. En este sentido, se resalta la urgencia de implementar estrategias sostenibles de manejo de suelos, control de fuentes contaminantes, monitoreo permanente y políticas públicas orientadas a garantizar la seguridad alimentaria y la protección de poblaciones vulnerables.

Palabras clave: Contaminación, metales pesados, seguridad alimentaria.

Abstract: This research was based on a systematic literature review following the PRISMA 2020 protocol, through the search, selection, and analysis of scientific studies published between 2019 and 2026 in academic databases. The objective of the study was to identify and synthesize the available scientific evidence on the presence of heavy metals in food, their sources of contamination, their distribution in soils, water, and crops, and their impact on food security. The influence of anthropogenic activities such as mining, industry, and the use of agrochemicals was highlighted, as well as the application of strict inclusion criteria to ensure the quality, reliability, and structured synthesis of the available scientific knowledge. The results show that heavy metals, especially cadmium, lead, mercury, and arsenic, are persistent, bioaccumulative, and highly toxic elements that affect human health and ecosystems through their transfer along the food chain. Their concentrations vary depending on environmental, geological, and agricultural practices, generating significant risks such as neurological, renal, immunological, and genetic damage. In this sense, the urgent need to implement sustainable soil management strategies, control pollution sources, continuous monitoring, and public policies aimed at ensuring food security and protecting vulnerable populations is emphasized.

Keywords: Contamination, food security, heavy metals.

Copyright: Derechos de autor 2026 Marcial Plaza Santos.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

1. Introducción

El cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As) y mercurio (Hg) son metales pesados considerados contaminantes prioritarios debido a su elevada toxicidad ambiental, persistencia química y capacidad de bioacumulación y biomagnificación (Rashid et al., 2023; Hou et al., 2025; Zhou et al., 2021). Debido a que no se degradan fácilmente mediante procesos naturales, estos elementos pueden acumularse en los suelos y ser absorbidos por los cultivos, alcanzando concentraciones que comprometen la calidad e inocuidad de los alimentos (Loyde de la Cruz et al., 2022; Solano-Solano et al., 2025).

Su transferencia a lo largo de la cadena trófica constituye una importante vía de exposición para los seres humanos y los animales, generando potenciales efectos tóxicos sobre diversos sistemas biológicos y representando un problema relevante para la salud pública y la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios (Heredia, 2021; Reyes et al., 2016).

La presencia de metales pesados es especialmente preocupante en zonas con actividad minera histórica o contemporánea, donde los pasivos ambientales, escorrentías y residuos del procesamiento mineral pueden constituir fuentes continuas de contaminación de suelos y aguas superficiales (Manguí et al., 2025; Cano, 2025).

En contextos como los Andes bolivianos, con una larga tradición minera en el departamento de Potosí, la evaluación de metales pesados en sistemas agropecuarios ha sido escasamente abordada de forma integral, aunque investigaciones locales han evidenciado la presencia de arsénico y otros elementos en suelos y cultivos de microcuencas altoandinas, lo que sugiere un posible impacto sobre la seguridad alimentaria local (Chambi et al., 2012; Anaya-Raymundo et al., 2025; Medina et al., 2025).

No obstante, en el contexto regional persiste una importante brecha de conocimiento respecto a la contaminación por metales pesados en los sistemas agrícolas del municipio de Llallagua. Hasta la fecha, no se dispone de estudios integrales y sistemáticos que permitan cuantificar con suficiente rigor las concentraciones de estos elementos en suelos agrícolas y cultivos destinados al consumo humano.

Asimismo, la evidencia existente es insuficiente para establecer con claridad la magnitud de la influencia de las actividades mineras circundantes sobre la acumulación y movilidad de metales pesados en los agroecosistemas locales. Esta situación limita la comprensión de los mecanismos de transferencia desde el suelo hacia las plantas y posteriormente hacia la cadena alimentaria, dificultando la estimación de los riesgos potenciales para la salud humana y la integridad de los ecosistemas (Anaya et al., 2025; Solano-Solano et al., 2025; Zhou et al., 2021).

En consecuencia, la ausencia de evidencia científica local, actualizada y confiable restringe la formulación de políticas públicas, programas de monitoreo ambiental y estrategias de manejo agrícola sostenible orientadas a prevenir, controlar y mitigar estos impactos, afectando la toma de decisiones para la protección de los recursos naturales y el bienestar de las comunidades.

En este sentido, el objetivo de esta investigación es analizar y sintetizar críticamente la evidencia científica disponible sobre el efecto de la contaminación por metales pesados en la seguridad alimentaria, identificando las principales fuentes de exposición, los mecanismos de bioacumulación en la cadena trófica, los impactos en la salud humana, las normativas internacionales vigentes y las estrategias de mitigación y control, con el fin de sistematizar los principales aportes, avances teóricos, tendencias de investigación y estudios más relevantes sobre el tema (Page et al., 2021; Hou et al., 2025; Reyes et al., 2016).

2. Metodología

La presente investigación adoptó un enfoque de revisión bibliográfica sistemática, cuyo propósito fue identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible acerca de los efectos de la contaminación por metales pesados en la seguridad alimentaria. Este tipo de revisión permitió integrar de manera rigurosa y transparente los resultados de estudios previos mediante procedimientos estructurados de búsqueda, selección y análisis de la literatura científica.

El proceso metodológico se desarrolló siguiendo las directrices propuestas por Page et al. (2021) en el marco de PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que establecen criterios actualizados para la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios en revisiones sistemáticas. Estas directrices promovieron la transparencia, reproducibilidad y calidad metodológica en la revisión de literatura científica.

La búsqueda de información se centró en artículos científicos publicados en revistas internacionales indexadas y revisadas por pares, con el fin de garantizar la confiabilidad y rigor académico de las fuentes. Posteriormente, los estudios recuperados fueron sometidos a criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, permitiendo seleccionar aquellos que abordaron la presencia de metales pesados en alimentos y sus implicaciones para la seguridad alimentaria. Finalmente, la información seleccionada fue analizada y sintetizada con el objetivo de identificar tendencias de investigación, hallazgos relevantes y vacíos de conocimiento en la literatura científica.

La revisión bibliográfica se realizó en bases de datos internacionales como Google Scholar, SciELO, Redalyc y Scopus, así como en repositorios institucionales, utilizando como descriptores “metales pesados” y “seguridad alimentaria”. La búsqueda abarcó el periodo comprendido entre 2019 y 2026 y se desarrolló en diferentes etapas, en las que se seleccionaron las contribuciones más representativas relacionadas con los criterios establecidos. En los casos en que se identificaron aspectos específicos, se ampliaron las búsquedas para profundizar en temas particulares. El contenido fue organizado de manera secuencial, enfatizando la relación entre metales pesados y salud (Rodríguez, 2021).

3. Resultados

Contaminación de metales pesados en productos agrícolas y la seguridad alimentaria

Los metales pesados afectan la seguridad alimentaria, la salud pública y la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas en comunidades y pueblos. Reyes et al. (2016) afirman que estos elementos son persistentes, es decir, no pueden ser creados ni degradados mediante procesos biológicos o antropogénicos. Rashid et al. (2023) confirman que su presencia en los campos de cultivo se debe principalmente a actividades antropogénicas como la minería a cielo abierto, plantas termoeléctricas, descargas de aguas residuales, desechos industriales y prácticas agrícolas inadecuadas. Asimismo, Robles (2024) señala que el calentamiento global, la variabilidad climática y los cambios en la disponibilidad de nutrientes incrementan su dispersión en el ambiente y su absorción por plantas y organismos. En este sentido, la contaminación por metales pesados en alimentos representa un riesgo significativo para la salud pública, afectando de manera particular a poblaciones vulnerables.

La contaminación por metales pesados en productos alimenticios evidencia impactos directos en la salud humana. Zwierzchowski y Ametaj (2018) indican que el sistema de producción influye en los niveles de contaminación, observándose mayores concentraciones de arsénico (As), níquel (Ni),

cadmio (Cd), plomo (Pb) y aluminio (Al) en sistemas convencionales en comparación con los orgánicos. Vasconcelos Neto et al. (2019) corroboran que la exposición al plomo puede generar disfunción renal, hipertensión, anemia, disminución del coeficiente intelectual, alteraciones conductuales y enfermedades degenerativas articulares. De igual forma, Hou et al. (2025) confirman que el cadmio, el plomo y el cromo presentan alta persistencia ambiental, elevada movilidad y significativo potencial de transferencia trófica, lo que incrementa el riesgo ecotoxicológico.

La distribución y bioacumulación de metales pesados en suelos agrícolas representan un riesgo directo para la seguridad alimentaria y la salud humana, lo que exige estrategias sostenibles de remediación. Angon et al. (2023) señalan que la expansión de actividades mineras, urbanas y petroleras está directamente asociada con el incremento de estos contaminantes en sistemas agrícolas tropicales. Rashid et al. (2023) complementan que, en suelos con baja estabilidad coloidal o bajo contenido de humus, los metales tienden a migrar hacia capas más profundas, aumentando el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

Las concentraciones de metales pesados en suelos generan efectos negativos en los cultivos y su calidad agrícola. Cano (2025) indica que los altos niveles de contaminación están relacionados con el uso de aguas residuales industriales y domésticas para el riego. Liu et al. (2021) corroboran que los suelos destinados a cultivos hortícolas presentan mayores niveles de contaminación por oligoelementos en comparación con los suelos destinados a cereales. Finalmente, Cano (2025) concluye que los suelos con pastos cultivados bajo riego presentan concentraciones de cadmio (13,563 mg/kg) y cromo (7,46 mg/kg), mientras que los pastos naturales bajo régimen de precipitación presentan 13,115 mg/kg de Cd y 7,15 mg/kg de Cr, superando en ambos casos los estándares normativos establecidos en Perú.

Los metales pesados y su efecto en los suelos

Las actividades mineras e industriales liberan metales pesados, alterando la composición natural del suelo. Anaya-Raymundo et al. (2025) afirman que la acumulación de estos elementos degrada la calidad del suelo y afecta negativamente la productividad agrícola. Estos contaminantes modifican la estructura, fertilidad y capacidad del suelo para sostener la vida vegetal, al inhibir la actividad enzimática, alterar el ciclo de nutrientes y reducir su disponibilidad para las plantas. Loyde de la Cruz et al. (2022) corroboran que las altas concentraciones de metales pesados interrumpen los procesos edáficos naturales, generando cambios en el pH del suelo y en la disponibilidad de nutrientes, lo que puede afectar el crecimiento vegetal e incluso provocar la muerte de los cultivos, impactando directamente la producción agrícola y su calidad.

Los metales pesados también alteran el equilibrio químico del suelo y reducen la actividad de microorganismos benéficos, deteriorando la calidad edáfica. Loyde de la Cruz et al. (2022) indican que el pH juega un papel fundamental, ya que en suelos ácidos el cadmio se vuelve más soluble y, por tanto, más disponible para las plantas. Asimismo, la materia orgánica puede inmovilizarlo mediante la formación de complejos o liberarlo dependiendo de su origen, mientras que la capacidad de intercambio catiónico influye en su retención y movilidad. Solano-Solano et al. (2025) complementan que a valores de pH por debajo del punto de carga cero (PZC), las superficies del suelo presentan carga neta positiva, mientras que por encima del PZC predominan las cargas negativas, lo que condiciona la adsorción de metales.

La absorción de metales pesados por las raíces induce fitotoxicidad y estrés oxidativo en las plantas, reduciendo el rendimiento agrícola. Loyde de la Cruz et al. (2022) señalan que estos elementos pueden

transferirse del suelo a los cultivos mediante bioacumulación, incorporándose en los tejidos vegetales y posteriormente en la cadena alimentaria, afectando la salud de animales y seres humanos. Solano-Solano (2025) complementa que estos procesos están relacionados con mecanismos de adsorción en suelos, donde el ion Cd^{2+} interactúa con superficies minerales de carga permanente mediante fisisorción, formando complejos de esfera externa, en los que el catión mantiene su capa de hidratación e interactúa mediante fuerzas electrostáticas débiles.

Los metales pesados y su efecto en los ríos

La concentración de metales pesados en suelos destinados a pastos cultivados bajo riego y a secano puede generar impactos en los sistemas hídricos. Cano (2025) indica que los altos niveles de contaminación del suelo están relacionados con el uso de aguas residuales de origen industrial y doméstico para el riego de cultivos. Liu et al. (2021) corroboran que los suelos destinados a huertos de frutas y hortalizas presentan mayores niveles de contaminación por oligoelementos en comparación con los suelos destinados a cereales. Cano (2025) concluye que los suelos con pastos cultivados bajo riego presentan concentraciones de cadmio (13,563 mg/kg) y cromo (7,46 mg/kg), mientras que los pastos naturales bajo régimen de precipitación presentan 13,115 mg/kg de Cd y 7,15 mg/kg de Cr, superando en ambos casos los estándares normativos establecidos en Perú.

La actividad minera contribuye significativamente a la liberación de metales pesados como plomo, arsénico, cadmio y mercurio, los cuales no se degradan y permanecen en el ambiente, afectando la calidad del agua y del suelo. Mangui et al. (2025) indican que las concentraciones iniciales y finales de estos metales muestran excedencias respecto a los límites permisibles. En particular, el arsénico supera el valor de referencia de 12 mg/kg de suelo. Asimismo, en aguas residuales se reporta que el 26% de las muestras exceden los límites de plomo establecidos en 0,2 mg/L, con valores entre 0,017 mg/L y 0,466 mg/L, mientras que el 30% supera los límites de cadmio, con concentraciones entre 0,009 mg/L y 0,774 mg/L.

La elevada toxicidad de estos elementos afecta la biodiversidad acuática y favorece su incorporación en la cadena trófica. Ansari et al. (2004) señalan que el fitoplancton es especialmente sensible a la contaminación por metales pesados debido a su alta tasa de crecimiento y capacidad de bioacumulación, lo que lo convierte en un bioindicador relevante de contaminación en ecosistemas acuáticos. Poot et al. (2026) complementan que múltiples factores influyen en la concentración y especiación de metales en ambientes acuáticos, lo que puede limitar la precisión de su medición. Asimismo, los autores destacan que los metales analizados (As, Hg y Pb) fueron seleccionados debido a su presencia previa en sedimentos del área de estudio.

4. Discusión

Contaminación de metales pesados en productos agrícolas y la seguridad alimentaria

La producción de alimentos en zonas mineras incrementa significativamente el riesgo de contaminación por metales pesados en sistemas agrícolas. En este contexto, Rashid et al. (2023) señalan que la principal fuente de estos contaminantes proviene de actividades antropogénicas como la minería, plantas termoeléctricas, descargas de aguas residuales, residuos industriales y prácticas agrícolas inadecuadas, lo que evidencia la necesidad de identificar sus fuentes y fortalecer estrategias de mitigación. Asimismo, Robles (2024) destaca que factores globales como el cambio climático, la variabilidad climática y las alteraciones en la disponibilidad de nutrientes intensifican la movilidad y

dispersión de estos elementos, incrementando su absorción por los cultivos y elevando el riesgo para la salud pública, especialmente en poblaciones vulnerables.

La evidencia analizada permite establecer que la contaminación por metales pesados en los sistemas agrícolas constituye una amenaza crítica para la seguridad alimentaria y la salud humana. Reyes et al. (2016) enfatizan que estos elementos presentan una elevada persistencia ambiental y capacidad de acumulación y transferencia en la cadena alimentaria, debido a que no pueden ser creados ni degradados mediante procesos biológicos o antropogénicos, lo que favorece su permanencia en el ambiente. Este comportamiento refuerza su carácter acumulativo y su potencial de bioamplificación, lo cual incrementa los niveles de exposición en diferentes niveles tróficos.

En conjunto, los hallazgos evidencian que la problemática de los metales pesados no solo está determinada por fuentes locales de contaminación, sino también por factores ambientales globales que amplifican su distribución y efectos. Esto implica que la gestión del riesgo debe abordarse desde un enfoque integral, que considere tanto las actividades productivas como las dinámicas climáticas y ecológicas. En este sentido, se requiere fortalecer políticas de monitoreo ambiental, control de emisiones y estrategias de remediación orientadas a reducir la transferencia de estos contaminantes hacia la cadena alimentaria.

Los metales pesados y su efecto en los suelos y ríos

La contaminación por metales pesados en cultivos y productos alimenticios representa un riesgo significativo para la seguridad alimentaria y la salud humana. Diversos estudios señalan que el tipo de sistema de producción influye en los niveles de contaminación, registrándose mayores concentraciones de arsénico (As), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb) y aluminio (Al) en sistemas convencionales en comparación con los orgánicos (Zwierzchowski & Ametaj, 2018; Vasconcelos Neto et al., 2019). Esta condición incrementa la exposición alimentaria a contaminantes asociados con disfunción renal, hipertensión, anemia, alteraciones neurológicas y disminución del coeficiente intelectual (Vasconcelos Neto et al., 2019), lo que evidencia su impacto directo en la salud pública.

En este contexto, el cadmio, el plomo y el cromo destacan como los metales más persistentes, con mayor potencial de transferencia trófica y riesgo ecotoxicológico. La distribución y bioacumulación de estos elementos en suelos agrícolas están condicionadas por factores geoquímicos como el pH, la textura del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (Hou et al., 2025). Asimismo, en suelos con baja estabilidad coloidal o escaso contenido de humus, los metales tienden a migrar hacia capas más profundas del perfil del suelo, incrementando el riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Angon et al., 2024). Este comportamiento refuerza la necesidad de estrategias integrales de manejo y remediación de suelos, orientadas a reducir el riesgo ambiental y sanitario (Rashid et al., 2023).

Por otro lado, la contaminación de suelos agrícolas asociada a actividades petroleras y el uso de aguas residuales domésticas e industriales para riego constituye un factor adicional de riesgo para la seguridad alimentaria. Cano (2025) señala que los suelos destinados a huertos de frutas y hortalizas presentan mayores niveles de contaminación por oligoelementos en comparación con los cultivos de cereales. Así mismo, Liu et al. (2021) reportan concentraciones elevadas de cadmio (13,563 mg/kg) y cromo (7,46 mg/kg) en suelos con pastos cultivados bajo riego, así como 13,115 mg/kg y 7,15 mg/kg respectivamente en pastos naturales bajo secano, superando los límites establecidos por la normativa ambiental. Estos hallazgos evidencian la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo y estrategias sostenibles de gestión del suelo y del agua para reducir los riesgos ambientales y sanitarios asociados (Cano, 2025).

5. Conclusiones

El análisis del efecto de la contaminación por metales pesados en la seguridad alimentaria, desarrollado a partir de la evidencia científica sobre su presencia en alimentos, suelos y agua, permite consolidar una línea de investigación de alta relevancia ambiental y sanitaria. La contaminación por metales pesados en los sistemas agrícolas constituye una problemática compleja debido a su persistencia, capacidad de bioacumulación y transferencia a lo largo de la cadena alimentaria.

La evidencia revisada demuestra que elementos como el cadmio y el plomo representan un alto riesgo toxicológico por su estabilidad ambiental y su fácil incorporación en los cultivos, especialmente en contextos influenciados por actividades antropogénicas como la minería, la industria y prácticas agrícolas inadecuadas. Asimismo, factores climáticos como el cambio climático y la variabilidad ambiental intensifican la movilidad, biodisponibilidad y dispersión de estos contaminantes en los suelos agrícolas, incrementando la exposición humana a través de los alimentos. En este sentido, se evidencia la necesidad de fortalecer estrategias de gestión sostenible, monitoreo y control de fuentes contaminantes para garantizar la seguridad alimentaria a largo plazo.

La contaminación por metales pesados en cultivos y productos alimenticios representa un problema crítico de salud pública, determinado por la interacción de múltiples factores antropogénicos y ambientales. Actividades como la minería y la industria incrementan significativamente la presencia de elementos tóxicos en sistemas agrícolas y ganaderos. Asimismo, el tipo de sistema productivo influye directamente en los niveles de contaminación, observándose mayores concentraciones en sistemas convencionales, lo que incrementa los riesgos de exposición alimentaria y sus efectos adversos en la salud humana, tales como alteraciones neurológicas, renales e inmunológicas.

Además, factores geoquímicos como el pH del suelo, la textura y la capacidad de intercambio catiónico, junto con el uso de aguas contaminadas para riego, favorecen la bioacumulación y transferencia de estos elementos en la cadena trófica. En este contexto, metales como el cadmio, plomo y cromo destacan por su elevada persistencia y riesgo ecotoxicológico, agravado por la expansión de actividades extractivas y urbanas. Por lo tanto, se requiere la implementación de estrategias integrales de monitoreo, remediación y gestión sostenible de suelos agrícolas.

En conclusión, la evaluación y cuantificación de metales pesados en suelos agrícolas, agua de riego y cultivos resulta fundamental para determinar los niveles de contaminación y su relación con los límites permisibles establecidos en normativas ambientales y de seguridad alimentaria. La evidencia analizada demuestra que las concentraciones de estos contaminantes varían significativamente según las actividades antropogénicas, como la minería, la industria y el uso de agroquímicos, así como por las condiciones específicas de cada agroecosistema.

Asimismo, el uso de aguas de riego contaminadas y la escorrentía de fertilizantes y plaguicidas favorecen la incorporación de metales pesados en los sistemas productivos, incrementando su disponibilidad y bioacumulación en los cultivos. Además, factores como el pH del suelo, la calidad del agua y la influencia de actividades urbanas e industriales potencian la acumulación y movilidad de estos elementos, generando riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas. En este contexto, la evidencia de concentraciones que superan los límites normativos en diversos sistemas agrícolas refuerza la necesidad de implementar programas de monitoreo continuo y estrategias sostenibles de manejo de suelos y recursos hídricos, con el fin de reducir los riesgos ambientales y garantizar la seguridad alimentaria a largo plazo.

Referencias

- Anaya-Raymundo, M., Ruíz-Janje, A., Blas-Montenegro, L., Angulo-Valdivia, R., & De la Cruz Cámaco, D. (2025). Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales. *Manglar*, 22(2), 287–301. <https://doi.org/10.57188/manglar.2025.030>
- Angon, P., Islam, M., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10, e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Ansari, T., Marr, I., & Tariq, N. (2004). Heavy metals in marine pollution perspective—A mini review. *Journal of Applied Sciences*, 4(1), 1–20. <https://doi.org/10.3923/jas.2004.1.20>
- Cano, J. (2025). Metales pesados en suelos y su bioacumulación en pastos irrigados con aguas contaminadas por minería en la irrigación Canal N Puno. *Revista Bio Ciencias Agroambientales Aplicadas*, 23(2). <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/2403>
- Chambi, L., Orsag, V., & Niura, A. (2012). Evaluación de la presencia de metales pesados y arsénico en suelos agrícolas y cultivos en tres micro-cuencas del municipio de Poopó. *Revista Boliviana de Química*, 29(1), 111–118. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426339677012>
- Heredia, D. (2021). Metales pesados y salud. *Correo Científico Médico*, 25. <https://n9.cl/hwt1r4>
- Hou, D., Jia, X., Wang, L., McGrath, S., Zhu, Y., Hu, Q., Zhao, F., Bank, M., O'Connor, D., & Nriagu, J. (2025). Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 388(6744), 316–321. <https://doi.org/10.1126/science.adr5214>
- Loyde de la Cruz, L., González, B., Cruz, A., & Loredó, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *Epistemos*, 16(33), 93–98. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.228>
- Manguí, A., Mendoza, M., & Ágreda, J. (2025). Modelación hidrogeoquímica del transporte de metales pesados ríos andinos del Ecuador. *Revista Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad*, 4(2), 11–23. <https://doi.org/10.61236/renpys.v4i2.1117>
- Medina, C., Mendoza-Toletino, Y., & Pérez-Laínez, M. (2025). Determinación de plomo y cadmio en aguas del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(30), e4043. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i30.4043>
- Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Poot, C., Rendon von Ostén, J., Borges, M., Okolodkov, Y., & Pérez-Morales, A. (2026). Impacto de los metales pesados (As, Hg y Pb) en la estructura fitoplanctónica de las aguas costeras de Campeche, sureste del Golfo de México. *Revista Bio Ciencias*, 13, e1900. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1900>
- Rashid, A., Schutte, B., Ulery, A., Deyholos, M., Sanogo, S., Lehnhoff, E., & Beck, L. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: Environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>

- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://n9.cl/iy1tg2>
- Robles, M. (2024). Seguridad alimentaria: riesgos asociados a metales pesados sobre la salud humana. *Journal of American Health*, 7(2). <https://www.jah-journal.com/index.php/jah/article/view/204>
- Solano-Solano, C., Castillo-Muñoz, R., & Méndez, J. (2025). Aspectos geoquímicos de la disponibilidad de cadmio en suelos: conocimiento actual y prospectivas en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 49(E01). <https://doi.org/10.15517/qngffe11>
- Zhou, S., Su, S., Meng, L., Liu, X., Zhang, H., & Bi, X. (2021). Potentially toxic trace element pollution in long-term fertilized agricultural soils in China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 789, 147967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147967>
- Zwierzchowski, G., & Ametaj, B. (2018). Minerals and heavy metals in the whole raw milk of dairy cows from different management systems and countries of origin: A meta-analytical study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00904>

Transparencia

Conflicto de interés

La autora declara que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

La autora financia completamente la investigación.

Contribución de autoría

Marcial Plaza Santos: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

La autora intervino de manera activa en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del texto final del artículo.