

Una mirada a las investigaciones sobre metales pesados y/o metaloides en Colombia

A look at research on heavy metals and/or metalloids in Colombia

Gilberto Eduardo Marín Pimentel¹ 

Siembra 13 (2) (2026): e9833
DOI: [10.29166/siembra.v13i2.9833](https://doi.org/10.29166/siembra.v13i2.9833)

Recibido: 22/03/2026
Revisado: 04/05/2026 / 15/07/2026
Aceptado: 27/07/2026



¹ Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Carrera 32 No. 12-00 Vía Candelaria. 766533. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

Correspondencia: gemarinp@unal.edu.co

Resumen

En función de la importancia que tiene la conservación del medio natural. Se realizó una revisión de literatura en los principales buscadores académicos y revistas especializadas del ámbito científico agropecuario en los últimos años, con relación a las investigaciones realizadas en Colombia, en referencia a la interacción que tiene los metales pesados y/o metaloides en factores bióticos y abióticos de los ecosistemas de Colombia. Son analizadas las técnicas instrumentales, análisis de correlación, toxicidad, acumulación, bioindicación, eliminación, migración, fitorremediación y biomonitoreo relacionadas con estos los elementos químicos. Las investigaciones presentadas se refieren principalmente a la interacción de estos elementos con fracciones inertes del suelo, riesgos latentes a la salud humana por exposición o consumo de alimentos, alteración de la morfología de las plantas y la capacidad de algunas de ellas para acumular metales del mismo modo que los animales, el movimiento que tienen ellos en la cadena alimentaria, así como la aptitud de bioindicación de algunas especies biológicas y su poder de depuración. La revisión no establece puntos claros de soporte para medir la afectación de la contaminación, por metales pesados en los ecosistemas colombianos, a través de índices o indicadores aplicados en nuestro contexto. Es importante profundizar las investigaciones en temas relacionados con la salud pública, asociadas al tipo de labor que realizan los colombianos o el tipo de alimentación que consumen, buscado medir el grado de incidencia de los metales en las enfermedades que padecen.

Palabras clave: contaminación, interacción, metal pesado, salud, sensibilidad.

Abstract

Given the importance of natural environment conservation, a literature review was conducted using major academic databases and specialized journals in the agricultural sciences. The review focused on research carried out in Colombia regarding the interaction of heavy metals and/or metalloids with biotic and abiotic factors in Colombian ecosystems. Instrumental techniques, correlation analyses, toxicity, accumulation, bioindication, elimination, migration, phytoremediation, and biomonitoring related to these chemical elements were analyzed. The research presented primarily addresses the interaction of these elements with inert soil fractions, latent risks to human health from exposure to or consumption of food, alterations in plant morphology, and the capacity of some plants to accumulate metals in the same way as animals. The review also exami-

SIEMBRA
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>
ISSN-e: 2477-8850
Periodicidad: semestral
vol. 13, núm 2, 2026
siembra.fag@uce.edu.ec



© Los Autores 2026

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

nes the movement of these elements through the food chain, the bioindication potential of certain biological species, and their detoxification capacity. The review does not establish clear points of reference for measuring the impact of heavy metal pollution on Colombian ecosystems using indices or indicators applicable to our context. It is important to further research public health issues related to the types of work Colombians perform or the types of food they consume, seeking to measure the degree of incidence of metals in the diseases they suffer.

Keywords: contamination, interaction, health, heavy metal, sensitivity.

1. Introducción

El presente documento permitió realizar una revisión de las principales investigaciones realizadas en Colombia, respecto al comportamiento de los metales pesados y/o metaloides en diferentes ámbitos del desarrollo agropecuario y ambiental y que son inherentes al suelo, agua, aire, plantas o animales. El concepto de metal pesado se refiere a un grupo de elementos que potencialmente causan problemas de toxicidad incluidos los metales y metaloides como el Cd, Pb, Sn, Cu y Zn de una masa alta relativamente ($>4.5 \text{ g cm}^{-3}$) (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Estos elementos tienen la capacidad de ser tóxicos a bajas concentraciones y desde el punto de la toxicológica ambiental son definidos los metales pesados y metaloides con una densidad mayor a 5 g cm^{-3} (Ziegler-Rivera et al., 2026). Estos elementos son contaminantes peligrosos debido a los elevados tiempos de vida promedio y que no son biodegradables, afectando la seguridad alimentaria mundial porque es imposible asegurar alimentos libres con estos agentes nocivos (Perez Mora, 2021). La forma química del metal pesado tiene efecto en su toxicidad, distribución, movilidad y disponibilidad biológica más no de la concentración total del elemento (Reyes et al., 2016).

En consideración a la toxicidad, las cantidades traza de los metales pesados y/o metaloides, normalmente por debajo de 10 mg kg^{-1} , son indispensables para la vida el Zn, Fe, Cu, Co, Mg Mo, mientras tanto, inclusive a bajas concentraciones son tóxicos y no tienen funciones biológicas el Cr, As, Hg y Cd (Ziegler-Rivera et al., 2026). Así mismo, los metales Hg, As, Cd y Pb son elementos de alto grado de toxicidad con consecuencias incalculables para la salud a diferencia de elementos como el Ba, Li, Al y Sn de baja nocividad (Filipoiu et al., 2022). La toxicidad por metales pesados se puede medir en suelos y aguas a través bioensayos. En suelos se realizan pruebas relacionadas con la germinación de semillas-elongación de raíz, analizando el efecto fitotóxico, en cambio en aguas se puede realizar a través de la disminución de la luminiscencia al unir fases acuosas con una bacteria acuática (*Vibrio fischeri*) a través del tiempo.

Entre tanto, en organismos mayores la toxicidad por estos elementos se mide por medio de una dosis letal que cause la muerte al 50% de una población viva (LD50), normalmente ratas o ratones (Pabón Guerrero et al., 2020).

Estos elementos presentan gran dificultad para remediar en la naturaleza debido a su alta persistencia y su capacidad para deteriorar los cuerpos de agua, los cultivos agrícolas, la atmósfera, además que son una gran amenaza del bienestar y salud de humanos y animales (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). El estudio de estos elementos es de vital trascendencia en diferentes medios, debido a la alta toxicidad, elevada persistencia, veloz acumulación en los organismos vivos y considerando que a corto plazo no son fácilmente detectables, es por eso que su toxicidad está directamente relacionada con su destreza para ser absorbidos por el factor biótico (Prieto-Méndez et al., 2009; Reyes et al., 2016). Los metales pesados son dañinos para todos los seres vivos, normalmente ingresan al cuerpo humano por la ingestión o la absorción, se acumulan lentamente a lo largo del tiempo y se vuelven perjudiciales en el momento en que es mayor su tasa de acumulación que de descarga (Kamran et al., 2013).

En consecuencia, de su alta densidad son elementos difíciles de eliminar de los organismos y del ambiente, no tienen una degradación química y biológica, inclusive pueden moverse a través de membranas acumulándose en los organismos vivos (Lara-Trejo y Gaytán-Oyarzun, 2025). En el caso de que estos haya acumulación de estos elementos en tejidos óseos y grasos, los cuales envuelven los minerales nobles y gradualmente se van libreando al cuerpo, lo que puede ocasionar diversas patologías (Guerra et al., 2012). Promover la productividad agrícola, con una aplicación excesiva de productos químicos, incide sustancialmente en elevar los niveles de metales pesados en los suelos de cultivo, lo que es sinónimo de alarma, porque a través de la cadena alimentaria puede colocar en peligro la salud humana (Kelepertzis, 2014).

En el estudio realizado Mahecha Pulido et al. (2017) la finalidad era recoger e identificar un punto de partida de investigaciones sobre metales pesados en Colombia, principalmente en actividades agrícolas

y de lo cual sus principales consideraciones reflejan una baja investigación en temas que involucran a los metales pesados en la productividad agrícola (cultivos, suelos o insumos), además identificaron que siguen la siguiente secuencia Cd>Pb>Hg>Cr>Ni>Cu=Zn=As>Mn>Fe los elementos más estudiados en el país y se destacan por ser relevantes Cd, Pb, Hg y Cr. El estudio de estos elementos químicos es de vital importancia en relación con la productividad y sostenibilidad de los recursos de Colombia.

Es por eso que prácticas agrícolas poco adecuadas, favorecen el ingreso de metales pesados a los suelos, lo que representa un riesgo para la salubridad de las personas y hace necesario un sistema de monitoreo por parte de las entidades encargadas de evitar la afectación (García-Céspedes et al., 2016). La finalidad de este documento es proporcionar una mirada al énfasis de las investigaciones realizadas en Colombia sobre metales pesados y/o metaloides en diferentes ambientes que diluyan las necesidades de futuros estudios sobre este contexto. La revisión no establece puntos precisos de ayuda para cuantificar la afectación de la contaminación, por elementos metálicos en los ecosistemas de Colombia, por medio de índices o indicadores.

2. Materiales y Métodos

El estudio corresponde a una revisión sistemática documental sobre el énfasis de las investigaciones sobre metales pesados en Colombia en diferentes ambientes, dando un panorama de intereses principales en este campo y algunas insuficiencias de investigación.

2.1. Criterios de búsqueda bibliográfica y exclusión

La revisión de investigaciones fue realizada para Colombia incluyendo artículos científicos y de revisión desde el año 1998 hasta el 2025, con la intención de asegurar información relevante y modernizada. El idioma fue un factor de restricción, acotado al idioma español e inglés. El criterio de búsqueda fue “Investigaciones en Colombia sobre metales pesados” y en inglés “*Research on heavy metals in Colombia*”, visitando revistas especialmente colombianas, que tuvieron la mayor representatividad de investigaciones publicadas como Acta agronómica, Revista de Ciencias Agrícolas, Ciencia y Tecnología Agropecuaria, Revista de Investigación Agraria y Ambiental, Respuestas entre otras y apoyándose en las bases de datos ScienceDirect, y Scopus, Springer Link, SciELO y Redalyc. Las palabras claves consideradas

para la búsqueda fueron “metales pesados”, “metaloides”, “Colombia”, “contaminación”, “factor biótico” y “factor abiótico” utilizando el operador booleano “and” para hallar una información más precisa.

Fueron excluidos los artículos con fecha anterior a la acotada, los que no cumplían con el objetivo de la investigación y aquellos documentos que no se obtuvo el texto completo. Eliminado los documentos duplicados. Fue realizado un detallado análisis de los títulos y resúmenes para viabilizar la pertinencia del documento que luego fue confirmado por la minuciosa lectura del contenido. No fueron considerados investigaciones realizadas fuera de Colombia. En estas condiciones fueron hallados 104 documentos preliminares, eliminando 3 por no corresponder a un artículo sino a una información oficial de una entidad.

2.2. Criterios de Inclusión

Los resultados de las investigaciones sobre metales pesados fueron agrupados en los siguientes ocho ámbitos de interés en el estudio de estos elementos: especiación, toxicidad, acumulación, bioindicación, eliminación, migración, fitorremediación y biomonitoreo. Incluyendo las técnicas instrumentales. Los artículos seleccionados fueron encasillados en uno o varios campos en función del objetivo de la investigación. Es presentada la información más relevante a criterio del autor del presente documento, organizado en orden cronológico por cada ámbito. Fue determinada la frecuencia por cada ítem en un total de 50 investigaciones que cumplen con el criterio de inclusión, descartando 51 documentos. El análisis encontró 13 elementos químicos (Hg, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Co, Cu, V, Fe, Zn, Al, Mn) y los factores bióticos (humano, planta, animal y microorganismos y abióticos (suelo, aire, agua y otros).

3. Resultados

3.1. Características de las técnicas instrumentales aplicadas a determinar metales pesados y/o metaloides

En general el uso de una técnica para cuantificar la concentración de metales pesados en el entorno ambiental obedecerá entre otros a la cantidad de elementos a muestrear, el tipo de analito, la infraestructura humana y física habilitada, la matriz, así como si la determinación es eventual o acostumbrado (Amador, 2010). En la determinación de niveles de metales pesados y/o metaloides en Colombia sobresalen las técnicas espectrofotométricas como se observa en la

tabla 1, siendo la espectroscopia de absorción atómica de llama [FAAS, por sus siglas en inglés de *Flame Atomic Absorption Spectrometry*] la más común para metales como el Pb, Cd, Mn, Zn, Fe y As. La espectroscopia de absorción atómica [AAS], la espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente [ICP-MS] y la espectrometría de emisión por plasma acoplado inductivamente [ICP-OES] son las técnicas que destacan por ser las más utilizadas en la cuantificación de metales y se fundamentan en determinar la respuesta de los átomos a una fuente de energía en una muestra y varía una a otra en la cantidad de elementos que se pueden medir a la vez y su sensibilidad (Ziegler-Rivera et al., 2026).

La AAS emplea para excitar los átomos una llama y determinar la cantidad que absorben de luz limitando el análisis a pocos elementos y con limitada sensibilidad (Ziegler-Rivera et al., 2026). La atomización de la muestra se realiza por tres métodos diferentes, a través de flama (FAAS), de forma electroquímica (ETAAS) o por medio hidruros o vapores químicos (CVG-AAS) (Pabón Guerrero et al., 2020).

La atomización por llama presenta la debilidad tener altos límites de detección, un rango analítico limitado, cuantificar un solo elemento con alto volumen de muestra y emitir gases inflamables (Wilschefski y Baxter, 2019). La forma electroquímica requiere una optimización eficiente de la temperatura y adecuados modificadores químicos con el fin de lograr correctos resultados (Pabón Guerrero et al., 2020). En la técnica de hidruros para muestras biológicas se necesita complejas digestiones ácidas, necesita alto volumen de muestras, es limitado el rango analítico y es ideal para limitados elementos (Wilschefski y Baxter, 2019).

Para medir mercurio varios autores utilizan la espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío [CV AAS, por sus siglas en inglés]. Técnica derivada a partir de la generación de hidruros o vapores químicos (Pabón Guerrero et al., 2020). Método aplicable únicamente al elemento Hg ya que temperatura ambiente es el metal que tiene una presión de vapor apreciable (Skoog et al., 2001). Más aún en comparación con otras técnicas lleva cierta ventaja porque muy útil debido a su gran sensibilidad, velocidad, sencillez y

Tabla 1. Técnicas utilizadas para cuantificar la concentración de metales pesados y/o metaloides de diferentes ecosistemas en Colombia.
Table 1. Techniques used to quantify the concentration of heavy metals and/or metalloids in different ecosystems in Colombia.

Técnica Instrumental	Elemento	Autores
Titulación con EDTA utilizando murexide como indicador	Cu, Ni	Estupiñan et al. (1998)
Espectroscopia de absorción atómica de llama [FAAS]	Cd, Cu, Mn, Zn, Fe, As, Hg, Pb, Cr	Forero Hernández y Ballesteros González (2004); Hernández et al. (2001); Insuasty et al. (2008); Arroyave et al. (2010); Chamorro y Sánchez Andica (2013); Ortega (2014); Vergara Estupiñán y Rodríguez Africano (2015); Zafra Mejía et al. (2013); Ramírez Niño y Navarro Ramírez (2015); Peláez-Peláez et al. (2016)
Espectrometría UV-Visible [UV-Vis] y/o la Microscopía Electrónica de Barrido [SEM]	Fe, Cu, Ni, Mn, Al, Zn, Co	Ríos Álzate y Torres Pérez (2009); Doria Argumedo (2017)
Espectroscopia de masas de acoplamiento inductivo [ICP-MS]	Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, As, Ba, Mn	Flores et al. (2009); Sarria Carabalí (2014); Madera-Parra (2014); Zafra Mejía et al. (2013); Cortes (2015)
Voltametría de redisolución anódica de pulso diferencial adaptando una digestión de muestra acorde a Húlya	Cd, Pb	Madero y Marrugo (2011)
Analizador directo de mercurio [DMA-80] método EPA 7473.	Hg	Laza-Durante (2025)
Espectroscopia de absorción atómica [AAS] (Sin especificar el tipo)	Hg, Cr, Pb, Cu, Fe	Ramírez Franco y Enríquez Enríquez (2015), Martínez et al. (2017), Navarro Martinez et al. (2025).
Espectrofotometría de absorción atómico-generador de hidruros [HGAAS]	Cd, Cr, Pb, Hg	Ortiz-Romero et al. (2015); Ortiz Villa et al. (2016)
Espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío [CV AAS]	Hg	Arroyave et al. (2010); Madero y Marrugo (2011); Doria Mesquidaz (2013); Ortega (2014); Camargo et al. (2015); Racero-Casarrubia (2017); Fuentes Gándara et al. (2018)
Espectrofotometría de absorción atómica-horno de grafito [GFAAS]	Pb, Cd Zn, Cu, Cr, Ni, Zn, V	Doria Argumedo (2015); Racero-Casarrubia et al. (2017); Herrera-Herrera et al. (2019); Fuentes Gándara et al. (2018), Rueda-Saa et al. (2025)

relativa libertad de interferencia (Ruiz Chaves, 2016). Es considerada la técnica más adecuada para medir Hg (Pabón Guerrero et al., 2020). En este sentido, Ortiz Villa et al. (2016) cuantifican la concentración de Hg en pastos tratados con biosólidos, utilizando espectroscopia de absorción atómica con generador de hidruros, resaltando la aceptabilidad y seguridad del método.

El ICP-MS mezcla un detector muy sensible con plasma muy caliente que tiene la capacidad de medir de metales pesados en cantidades extremadamente pequeñas, denominadas ultratrazas (menores 1 mg kg⁻¹) (Ziegler-Rivera et al., 2026). La ICP-MS es una técnica amplia cualitativamente por la composición multielemental y cuantitativamente considerando en diferentes matrices la concentración y abundancia isotópica (Mazarakioti et al., 2022). Las ventajas que ofrece ICP-MS radican en la gran sensibilidad y celeridad en el análisis de muchos elementos, lo que redundará en determinar magnitudes menores a la ppm y la posibilidad de abarcar mayor cantidad de elementos en pocas muestras con reducido tiempo (Díaz Zamora, 2017). Otras ventajas de esta técnica se relacionan con una preparación sencilla de la muestra, rango analítico elevado y control de interferencias elevado con los instrumentos de masas de alta resolución y en tándem (Triple cuádruplo) (Wilschefski y Baxter, 2019). El ICP-MS tiene costos económicos razonables, salvo en el Ar del plasma y en la preparación de muestras, además, puede cuantificar de cada elemento isótopos individuales posibilitando realizar medidas de relación y dilución isotópica (Díaz Zamora, 2017).

En la actualidad, la espectrofotometría de absorción atómica horno de grafito [GFAAS por sus siglas en inglés] es una técnica que tiene alta sensibilidad debido a que la totalidad de la muestra se atomiza en un pequeño volumen logrando obtener una elevada densidad de átomos (OMS, 2013). Las desventajas de la GFAAS es que se requiere digestión ácida para ciertos elementos, limitado rango analítico, rendimiento bajo de las muestras y es una técnica de un solo elemento (Wilschefski y Baxter, 2019). La ICP-OES en el mundo es una de las técnicas más usadas para cuantificar en diferentes matrices trazas de elementos que frecuentemente precisan digestión, fundamentada en plasma eléctricamente neutro y con alta energía, formado por electrones, iones y partículas neutras normalmente de argón que acepta de un campo electromagnético de corriente continua o alta frecuencia, energía con temperaturas máximas de hasta 8000 °K. (Jiménez Heinert et al., 2020). Las desventajas incluyen límites de detección altos, costos elevados en los equipos, instalación del laboratorio y personal con alta experiencia (Wilschefski y Baxter, 2019).

3.2. Especiación

La especiación se refiere a la forma como se presentan los metales pesados en el ambiente semejantes a formas neutras, ionizadas o como elementos libres y permite delimitar la complejidad química de un medio (Castañé et al., 2003). En Colombia el estudio presentado por Forero Hernández y Ballesteros González (2004) evidencia el efecto de la adición de lodo sobre el suelo y el resultado sobre los metales pesados, presentándose un aumento representativo de la fracción de Cd unida a la materia orgánica en correspondencia con las fracciones intercambiables y enlazada a óxidos de hierro manganeso, mientras tanto el Cu mostró una mayor correlación a la fracción de óxidos de hierro-manganeso al igual Zn en tanto el Pb presentó una fracción acoplada a la materia orgánica y finalmente el Mn indicó la mayor fracción intercambiable en comparación con otros metales.

Así mismo, el fragmento de Cd obtuvo un mayor porcentaje (14%) de conexión con la materia orgánica en relación a la fracción enlazada a los óxidos de hierro y manganeso (4%), para tratamientos que tuvieron adiciones de lodos provenientes de la PTAR Salitre y se interpretaría por la gran aptitud de formación de complejos como el fenol y los grupos carboxilos comunes en la materia orgánica (Forero Hernández y Ballesteros González, 2004). De igual modo, la materia orgánica humificada [MOH] es importante en la asimilación del Cd a partir de los ácidos húmicos porque que crean enlaces sólidos en los grupos fenólicos y carboxílicos (Bravo et al., 2014).

Suelos con altas concentraciones de materia orgánica fija en mayor proporción el Cd (Estévez et al., 2000). Situación preocupante en zonas con suelos de altos contenidos de materia orgánica, porque aumenta la posibilidad de ser absorbidos por las especies vegetales y pasar a la cadena trófica. Igual situación ocurre con el Pb en la investigación realizada por Reyes Guzmán y Avendaño Prieto (2012) donde destaca el potencial riesgo para la salud humana.

3.3. Toxicidad

Los metales pesados ocupan una estrecha relación entre el ambiente y el hombre. Se encuentran en forma natural en muchas partes del ecosistema a bajas concentraciones. Cuando esto cambia suscitan alarma debido a su alta toxicidad. En Colombia, considerando la toxicidad, es presentado el estudio realizado por Bonilla y Castillo (1991), en el cual muestra que el pH actúa como controlador de metales en el suelo e interviene en la disponibilidad de estos para las plantas. Conforme con sus resultados, en tres órdenes de suelo

característicos del Valle del Cauca, exhiben que valores cercanos de pH igual a 6,5 los metales Cd, Cr y Hg se ligan altamente al complejo de cambio del suelo.

En otro estudio, Reyes Guzmán y Avendaño Prieto (2012) encontraron que el Pb en un porcentaje de 37,5 se encuentra ligado al suelo y un 27,2% de fácil acceso para las plantas o biodisponible en consideración al total hallado en el suelo, tendencias que son señales de alarma por el riesgo de formar parte de la cadena alimentaria. En actividades en el sector industrial existen evidencias de riesgo por exposición de metales pesados especialmente del plomo en el aire en los procesos de producción de baterías (Hernández, 2001).

En la investigación desarrollada por Ríos Álzate y Torres Pérez (2009), determinaron los contenidos de metales pesados de forma cualitativa y cuantitativa en reacciones de Zinc con Sulfato de Cobre (II) Pentahidratado, encontrando la presencia del Pb y el Ni en residuos de sulfatos de Zinc lo que indica un alto peligro para la salud humana a la vez que para la fauna y flora marina. En el análisis realizado por Peláez et al. (2014) con respecto de la toxicidad de los metales pesados Cd y Pb en plantas *Brachiaria arrecta*, cuantificando las modificaciones adversas en la morfoanatomía de planta que se traduce en supresión de funciones básicas asociadas a la nutrición, la fotosíntesis, la división celular entre otras. En el estudio de Calao y Marrugo (2015) en la Mojana, región colombiana, apuntan a una afectación en los pobladores del ADN por el efecto de los metales Hg y Cd en concordancia a que éstos sobrepasaron los límites permitidos en la sangre de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, 2013. En la revisión realizada por Londoño et al. (2016) esboza los graves efectos que tienen los niveles de metales pesados en los alimentos y el ambiente para los humanos como animales, afectando directamente la salud humana provocando incluso la muerte.

Cortés et al. (2017) evaluaron en dos suelos agrícolas, que correspondían a órdenes Andisol y Vertisol, la toxicidad de los elementos metálicos Ni, Cd, Cu, Pb y Zn, mediante bioensayos en *Lactuca sativa* y *Vibrio fischeri*, e infirieron la aptitud de los dos suelos en inhibir la toxicidad, que fue aumentando con el tiempo, y que se debe posiblemente a la relación de los distintos componentes del suelo con los metales. Trasladándose al Norte de Colombia, Doria Argumedo (2017) en zonas aledañas a la extracción minera de carbón, evaluó la calidad del aire mensurando las concentraciones de los metales pesados Cu, Cd, V y Pb y concluyendo que el entorno atmosférico no se encuentra contaminado con Pb, pero si con el resto de metales, así como el agua lluvia, lo que redundo en

que ésta no satisfaga con los estándares de calidad a nivel local e internacional. En función de los efectos limitantes desde el punto de vista productivo, es preponderante señalar la eliminación de tareas básicas de las plantas de *Brachiaria arrecta* con adiciones de Cd y Pb (Peláez et al., 2014). En contra sentido Ramirez Pisco et al. (2018) señala los contenidos de Cd en el suelo favoreció el crecimiento del área foliar, biomasa de raíz y tallo, así como producción de hojas en plantas de hierba mora lo que abre la discusión a los factores limitantes y nocivos de este elemento o su importancia en el aumento de la productividad.

3.4. Acumulación

En relación a estudios que involucren la acumulación de los metales pesados en factores bióticos o abióticos, Madero y Marrugo (2011) muestran sobre el ganado bovino de las áreas de San Jorge Sinú presentaron una baja acumulación de metales tóxicos (Pb y Hg), no obstante, es pertinente que diferentes organizaciones del sector agropecuario y de salud evalúen periódicamente estos elementos procurando evitar un incremento en las concentraciones en los tejidos de los animales y de igual manera incluyan buenas prácticas ganaderas. En el trabajo realizado por Doria Mesquidaz et al. (2013) con trabajadores de la mina El Alacrán presentaron concentraciones de mercurio en la orina, resultado de la exposición propias de su labor de amalgamación del oro, lo que simboliza un alto riesgo para su sanidad y demuestra que este metal es retenido con facilidad por los tejidos biológicos y el proceso de expulsión es muy lenta lo que indica su poder de toxicidad y/o bioacumulación. Por otro lado, Camargo et al. (2015) anunciaron valores a tener en cuenta respecto a la contaminación en suelos asociados a la utilización de Hg y ligados a zonas próximas de actividad minera.

En la investigación elaborada por Zafra Mejía et al. (2015) denotaron que los niveles de Pb y Zn en sedimentos viarios superaron los límites establecidos en Colombia con base en los valores definidos para suelos urbanos en Italia y Turquía. Ortiz-Romero et al. (2015) que buscaba determinar la concentración de los elementos Cr, Cd, Pb, Hg en los sedimentos y aguas del río Magdalena, citan la envergadura que tienen estos elementos como una reserva de información para valorar el estado del cuerpo del agua en proporción a su calidad. La investigación de Reyes et al. (2016) evidencian que la concentración de los elementos químicos correspondientes a Cd, Hg, Pb y As están presentes en la leche y la carne de especies bovinas asociado al consumo de pastos o forrajes e incluso de agua contaminada por estos elementos.

En el Magdalena medio colombiano, Peláez-Peláez et al. (2016) señalaron una gran adaptación de las pasturas *Brachiaria* especialmente *humidicola* y *decumbens* a suelos con altos contenidos de metales principalmente en sus primeros 5 cm, lo que denota que estas plantas en sus sistemas radicales preferentemente son potencialmente bioacumuladoras de Cd y Pb. En el año 2017, Chaparro et al. (2017) estimaron las concentraciones de Cd para el chocolate de mesa granulado y en polvo producido y distribuido en la municipalidad de Chiquinquirá Boyacá-Colombia, estableciendo comparativamente concentraciones más altas en la presentación en polvo comparado con la presentación granulada y concluyendo que este metal no estuvo por encima de los límites de ingesta semanal tolerable recomendable para este tipo de alimentos.

El artículo presentado por Doria Argumedo (2017) con el agua de mar contigua a la playa, en Riohacha, La Guajira, hallaron el contenido de los metales Co, Cu, Zn, Al, Mn, Ni y Fe indicando que Ni y el Zn ocupan valores por encima de los límites permitidos para aguas marinas y estuarinas, además destacan que su origen es antrópico principalmente por la actividad minera y del ciclo biogeoquímico de los metales. Herrera-Herrera et al. (2019) para Pb, Cd y Zn y según límites indicados por la Organización para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés], la Unión Europea y el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia se encuentran por debajo para todas las especies estudiadas y que no existe una relación entre la acumulación de metales pesados por el nivel trófico, probablemente es debido a las aguas de procedencia y se alerta por los procesos de enlatado que pudiesen estar ocasionando la contaminación por estos elementos.

Este mismo autor señala el riesgo relacionado por el proceso de bioacumulación de los metales Pb, Cd y Zn, en la comunidad Barranquillera y turística de la zona cuando midieron la concentración de estos elementos en tres especies de peces altamente comercializados *Prochilodus lineatus*, *Prochilodus reticulatus* y *Pangasianodon hypophthalmus*, al igual que una marca de atún y otra de sardina, evidenciando bajo riesgo a corto plazo pero no a largo, lo que muestra la necesidad de realizar un monitoreo periódico de estos elementos para evitar daños a la salud de los habitantes y visitantes del lugar. Por su parte, Fuentes Gándara et al. (2018) en la ciénaga de Mallorquín, Atlántico, trabajó con especies ícticas buscando definir la densidad de los metales Ni, Pb, Cr, Cu, Zn, Cd y Hg en tejido muscular y hepático, concluyendo de forma preocupante que todas las especies se encuentran acumulado estos elementos en ambos tejidos. En la re-

flexión realizada por Vargas Licon y Marrugo Negrete (2019) expone el riesgo de la población colombiana por el consumo de peces gracias a los análisis de las concentraciones de metales en los músculos además enfatiza en generar nuevos proyectos productivos que permitan otras fuentes de alimentación.

En la zona plana y piedemonte del Valle del Cauca se encontró que en suelos de los órdenes molisol, inceptisol y vertisol los niveles de metales pesados Hg, Cd, Cr, Ni, Pb y Co y el metaloide As no exceden los rangos típicos en suelos agrícolas, existiendo además una correlación estadística entre algunos de estos elementos (Rueda-Saa et al., 2025). En el Caribe colombiano en zonas de desembocadura de los ríos Sinú y Magdalena los sedimentos muestran concentraciones de ciertos metales y/o metaloides (Cd, As, Cr, Cu y Ni) por encima de valores de referencia de normas internacionales (Navarro Martínez et al., 2025). En casos de contaminación por plomo Vargas Mendoza et al. (2024) mencionan que existe una acumulación de plomo en varios alimentos como la panela, arroz, carne y leche de bovino, papas, alimentos para bebés y fresas en varios departamentos de Colombia de origen suelos contaminados y aguas de riego en zonas de gran producción agrícola e industrial.

3.5. Bioindicación

Organismos o comunidades biológicas cumplen el papel de bioindicadores ya que tienen una estrecha relación con las condiciones del lugar o entorno donde se desarrollan y sirven como certificado de una zona específica (Ramírez Cardona et al., 2008). Estos mismos autores en Medellín, Colombia, determinaron los niveles de los elementos Mg, Cu, Fe y Ca en el aire, utilizando la planta *pseudoliquen Tillandsia usneoides*, tratando los datos con el software Arc View 8.1 en el Valle de Aburrá. Además de bioindicación este estudio puede agruparse en el ámbito de biomonitoreo porque se miden los valores de los elementos analizados a través del tiempo. Una especie que puede ser utilizada como bioindicador del mercurio corresponde a la tilapia del Nilo, Vergara Estupiñán y Rodríguez Africano (2015) encontraron en la investigación una relación lineal altamente significativa entre la concentración del metal y la longitud estándar del pez. Respecto al sitio de muestreo biológico para medir concentración de metales pesados en los animales Tirado Amador et al. (2015) plantean con el fin de evitar sesgos o errores, es necesario utilizar diferentes partes del cuerpo para detectar los niveles de estos elementos, por ejemplo, el cabello, las uñas, la saliva, la orina o sangre porque pueden variar su concentración dependiendo de los hábitos o de la exposición ambiental de los animales a estas sustancias.

3.6. Eliminación

En la remoción de cobre y níquel Estupiñán et al. (1998) utilizaron zeolita natural clinoptilolita, en las aguas residuales provenientes de la industria galvanotecnica, revelando una gran efectividad de eliminación de estos metales, además de bajo costo la utilización de la zeolita sódica. Lora Silva y Bonilla Gutiérrez (2010) evidenció el efecto de la aplicación de diferentes dosis de CaCO_3 , CaSO_4 , de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, de FeSO_4 y de diatomácea activada en los niveles de Cd y Cr en la lechuga y pasto *ryegrass*, encontrando a partir de diferentes dosis de compuestos, una reducción significativa de los contenidos de metales para ambas especies vegetales.

La investigación realizada por Cortes et al. (2015) plantean la gran posibilidad de recuperar suelos sometidos a contaminación por metales pesados, de forma muy general, utilizando ácidos húmicos. Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez (2016) resaltan la importancia de los microorganismos como los hongos y las bacterias en procesos de biorremediación de diferentes ambientes, así como la utilización de ingeniería genética en dichos procesos, al igual la utilización de plantas hiperacumuladoras de metales y técnicas bastante prometedoras como la microrremediación y la fitorremediación. En el Alacrán, Departamento de Córdoba, en una zona minera, Martínez et al. (2017) hallaron que el cobre total, en los suelos agrícolas, estuvieron por arriba de los valores límite permitidos, para todas las directrices internacionales, en contraste con los niveles de mercurio que evidencian contaminación y que los contenidos de metales Fe y Cu fueron controlados por las propiedades químicas pH, CICE y MO, para formas totales, así como disponibles.

3.7. Migración

La disponibilidad de la concentración de metales pesados se liga principalmente al tipo de catión considerado y a las propiedades fisico-químicas del suelo en estudio (Reinaldo et al., 2014). Lo que dirige la movilidad de los metales en el suelo. Una investigación en suelos *Orthens*, *Tropepts*, de Tangua, Nariño el Cd total mostró baja movilidad, concentrándose más del 94% en la zona superficial y menos del 50% de éste pasó a ser intercambiable en esos suelos (IGAC, 1989, como se cita en Insuasty et al., 2006).

De igual manera, Barragan Moreno (2008) analizaron que la retención de Cd en el suelo se asocia directamente a los contenidos de materia y orgánica y dicha situación favorece la no absorción por parte de las plantas. Insuasty et al., (2008) en suelos de Túquerres, Pasto y Guachucal evaluaron la movilidad

y fijación del Cd total e intercambiable los cuales no excedieron los límites permitidos de la FAO y OMS e infirieron una baja movilidad en el perfil de este elemento. Chamorro y Sánchez Andica (2013) se analizó la adsorción del Pb en suelos del área de influencia minera en el Distrito de Buenos Aires, Departamento del Cauca, hallándose una baja retención por el suelo comparativamente con la cantidad de plomo que sale de la mina. Por otra parte, Cortés et al. (2014) encontraron que para órdenes de suelo Andisoles y Vertisoles al igual que para ácidos húmicos una relación lineal de adsorción de Cd, Pb, Zn, Ni y Cu a partir de las dosis suministradas e indicaron que se presentó un óptimo ajuste al modelo de isotermas de Freundlich.

Las condiciones físico-químicas pueden influenciar la presencia de metales pesados en suelos de orden Oxisol, debido a que no se evidenciaron valores por encima de los de referentes internacionales (Machecha-Pulido et al., 2015). En el mismo concepto de migración, Cortés et al. (2017) evidenciaron que los mecanismos de formación de complejos retardan la movilidad de los elementos metálicos Cd, Pb, Zn, Ni y Cu al igual que la relación con el aumento del pH en el suelo.

3.8. Fitorremediación

Las técnicas de fitorremediación son una alternativa muy útil para descontaminar suelos con metales pesados. La dificultad reside a las formas tradicionales de fitorremediación, las cuales son muy costosas en grandes áreas debido a que las plantas hiperacumuladoras naturales son de lento crecimiento, por ende, sería útil apoyarse en la ingeniería genética o con apoyo productos químicos o microbios (Sarwar et al., 2017). En consideración, Flórez Orjuela y Cotes Cuadro (2006) detectaron la aptitud para la absorción de plomo, cobre y cadmio al por parte *Salvinia natans* del mismo modo que la viabilidad para utilizarla en la descontaminación de aguas cuyo objetivo fuese el riego de cultivos o el abastecimiento de agua potable. Arroyave et al. (2010) analizaron la transmisión del Hg y el Cd desde el suelo hacia *Brachiaria distachneura* encontrado que esta tiene un mecanismo de tolerancia al Cd y Hg, resultado útil como agente de fitorremediación.

En otro ámbito ambiental un estudio consistente en evaluar tres especies vegetales como agentes de fitorremediación en lixiviados provenientes de relleños sanitarios, comprobaron una importante aptitud de acumulación de metales en las especies, con la salvedad de llegar a considerarlas como hiperacumuladoras y para lo cual su orden de desempeño fue de *Gynnerium sagittatum* > *Heliconia psittacorum* >

Colocasia esculenta para los metales Hg, Cd, Cr y Pb (Madera-Parra et al., 2014). En el artículo de investigación realizado por Ramírez Franco y Enríquez Enríquez (2015) encontraron una alta afinidad de la lignina por el Pb y la apropiada adsorción de metales por parte de la lignina. Por su parte, Domínguez et al. (2016) utilizando la macrófita acuática, buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), buscaron remover Hg en aguas contaminadas con residuos industriales, encontraron alta eficiencia en la remoción del metal, pero esos valores no alcanzaron los niveles permitidos según la Normatividad Colombiana para agua potable, lo que implica que esta planta puede ser utilizada en una etapa previa y después utilizar otra técnica para lograr los valores establecidos relacionados con la calidad de agua para consumo humano.

En la revisión realizada por Caviades Rubio et al. (2016) con 30 especies de plantas acuáticas muy tradicionales en el trópico americano, revela una amplia investigación en las especies *Eichhornia Crassipes*, *Pistia stratiotes* y *Lemna minor* primando su uso en tratamiento de aguas residuales y evidenciando gran versatilidad y tolerancia de metales en el agua producto de la actividad industrial, aunque se presenta cierta limitación en la eliminación de algunos metales específicos. Ramírez Pisco et al. (2018) plantean que *Solanum nigrum* es potencialmente útil en disminuir la cantidad de riesgo de Cd en suelos con cultivos de cacao. En el estudio elaborado por Ramírez Cardona et al. (2008) donde se evidenció una alta correlación entre el Cd y la planta hierba mora (*Solanum nigrum* L.), lo que visibiliza la importancia de esta especie vegetal como fitoextractora de este metal en suelos cultivados con cacao, y menciona las ventajas respecto a su veloz crecimiento, menores exigencias ambientales y buena capacidad de adaptación.

3.9. Biomonitorio

La evaluación ambiental de un territorio se determina de forma natural con el uso de bioindicadores que pueden constituir animales, especies vegetales u hongos los cuales deben cumplir como regla general abundancia en el territorio, dispersión, sedentarismo y resistir cantidades similares de contaminantes sin tener efectos letales sobre ellos (Leyte-Vidal et al., 2019). Las investigaciones sobre biomonitorio se han centrado en el trabajo realizado por Ramírez Cardona et al. (2008) que determinaron concentraciones de los metales Mg, Cu, Fe y Ca a través de la planta *pseudoliquen Tillandsia usneoides* en el aire ubicándola en 20 estaciones que miden la calidad de aire en la ciudad, diferenciando áreas de contaminación con el apoyo software Arc View 8.1. Situación similar al anterior

estudio sucede también con las especies bovinas ya que pueden cumplir también una función de detector de la polución por elementos químicos de alto peso molecular (Hg, Cu, Cd y Pb) en la cadena productiva (Madero y Marrugo, 2011). Estrada-Guerrero y Soler-Tovar (2014) mencionan la importancia de utilizar aves como indicadores de contaminación por metales pesados en humedales, ya que la investigación se ha centrado en utilizar peces en sistemas lóticos.

4. Discusión

Las investigaciones presentadas durante los últimos 25 años en Colombia con atención a los metales pesados o metaloides se refieren principalmente a la acumulación (26%) y toxicidad (20%) de estos elementos en medios bióticos y abióticos (Figura 1). Incluyendo también interacción de estos elementos con fracciones inertes del suelo, disponibilidad en función del pH, riesgos latentes a la salud humana por exposición o consumo de alimentos, alteración de la morfología de las plantas y la capacidad de algunas de ellas para acumular metales del mismo modo que los animales, el movimiento que tienen ellos en la cadena alimentaria, así como la aptitud de bioindicación de algunas especies biológicas y su poder de depuración.

El Pb, Cd y Hg sobresalen como los elementos de mayor interés en Colombia específicamente cuando son analizados en función de la acumulación, toxicidad y en menor proporción la fitorremediación y la migración. En 32 investigaciones fue analizado el Cd, 24 el Pb y 15 el Hg (Figura 2). Suscita el mayor interés de estos elementos en la acumulación en el ecosistema. Es necesario señalar algunos puntos claves que enfrenta nuestro territorio en la dinámica de estos elementos y cabe citar que en la Orinoquia Colombiana no se conoce con precisión las causas y factores determinantes que condicionan las concentraciones de Hg en los peces y potencian un problema de salud pública (Ortega, 2014). En la investigación realizada por Zafra Mejía et al., (2015) surge la intención de profundizar las investigaciones relacionadas con el efecto del cambio climático referente a la aglutinación de metales pesados en zonas urbanas.

El resultado de la presente revisión engloba diversos tópicos del entorno natural colombiano, que incluye diferentes elementos del ecosistema asociado a factores bióticos y abióticos donde se presenten metales pesados o metaloides (Figura 3). Las plantas con una frecuencia de 15 investigaciones superan ampliamente en el interés biótico comparado con los animales (5), humanos (2) y microorganismos (1). Indicando que la mayoría de las pesquisas no especifican

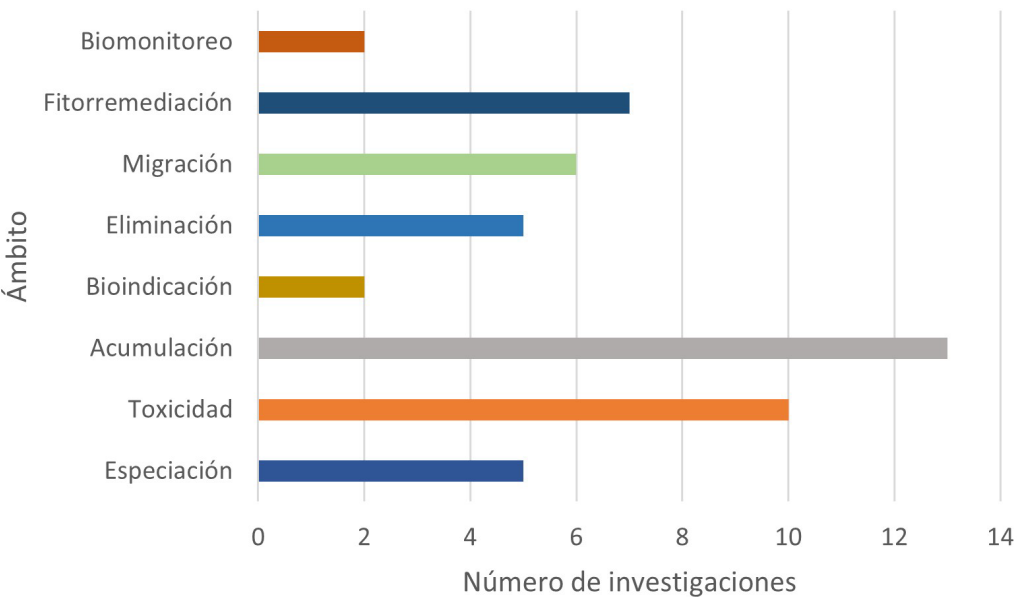


Figura 1. Frecuencia de las investigaciones en cada ámbito de investigación.
Figure 1. Frequency of research studies in each research area.

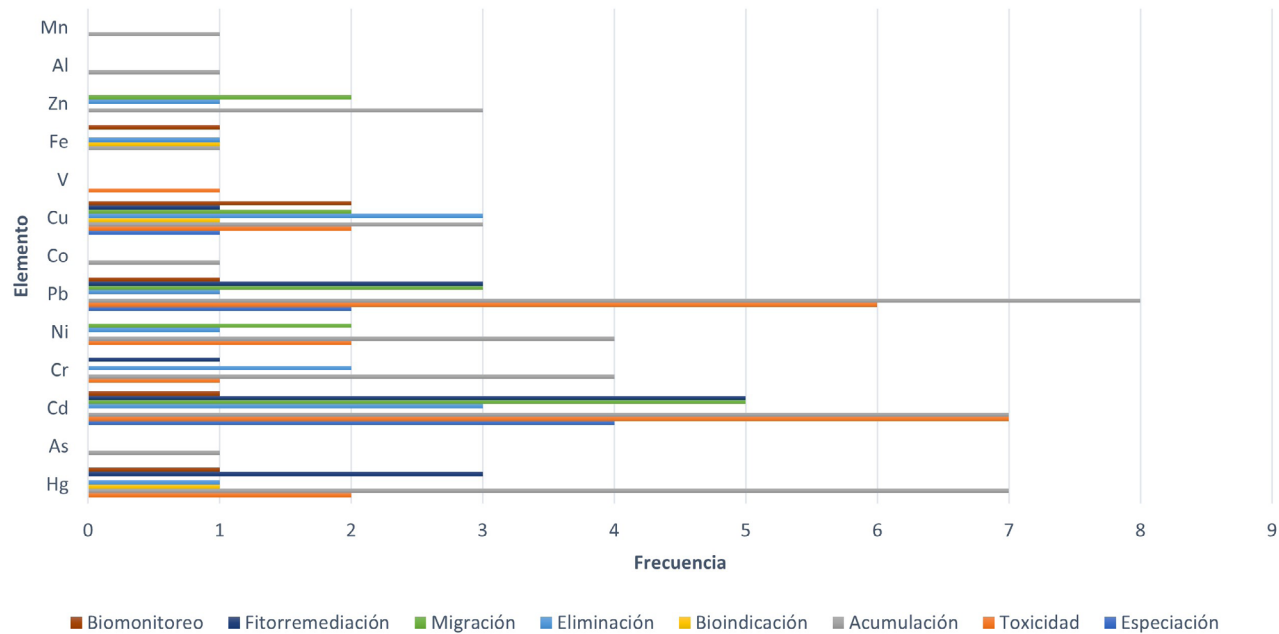


Figura 2. Frecuencia del elemento estudiado en cada ámbito de investigación.
Figure 2. Frequency of the element studied in each research area.

evidentemente el factor biótico (27). Realizar mayor investigación referente a plantas hiperacumuladoras de metales pesados al igual que microorganismos tolerantes permitiría reducir el impacto adverso de estos elementos (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez, 2016).

El suelo corresponde al factor abiótico de mayor investigación (21) en la mayoría de los ámbitos, seguido de otros elementos que incluyen sedimentos viales y de río, alimentos procesados, minerales, aguas re-

siduals, sales inorgánicas entre otros. Destacando la migración y especiación de estos elementos metálicos en el suelo. En el estudio realizado Ramírez Franco y Enríquez Enríquez (2015) no fue preciso determinar si los suelos en estudio se encuentran contaminados con metales pesados debido a que a la fecha no se encuentran definidos valores o límites de referencia asociados a la formación geológica e indican la importancia de definir esos valores.

Existen varios estudios con relación a la acumula-

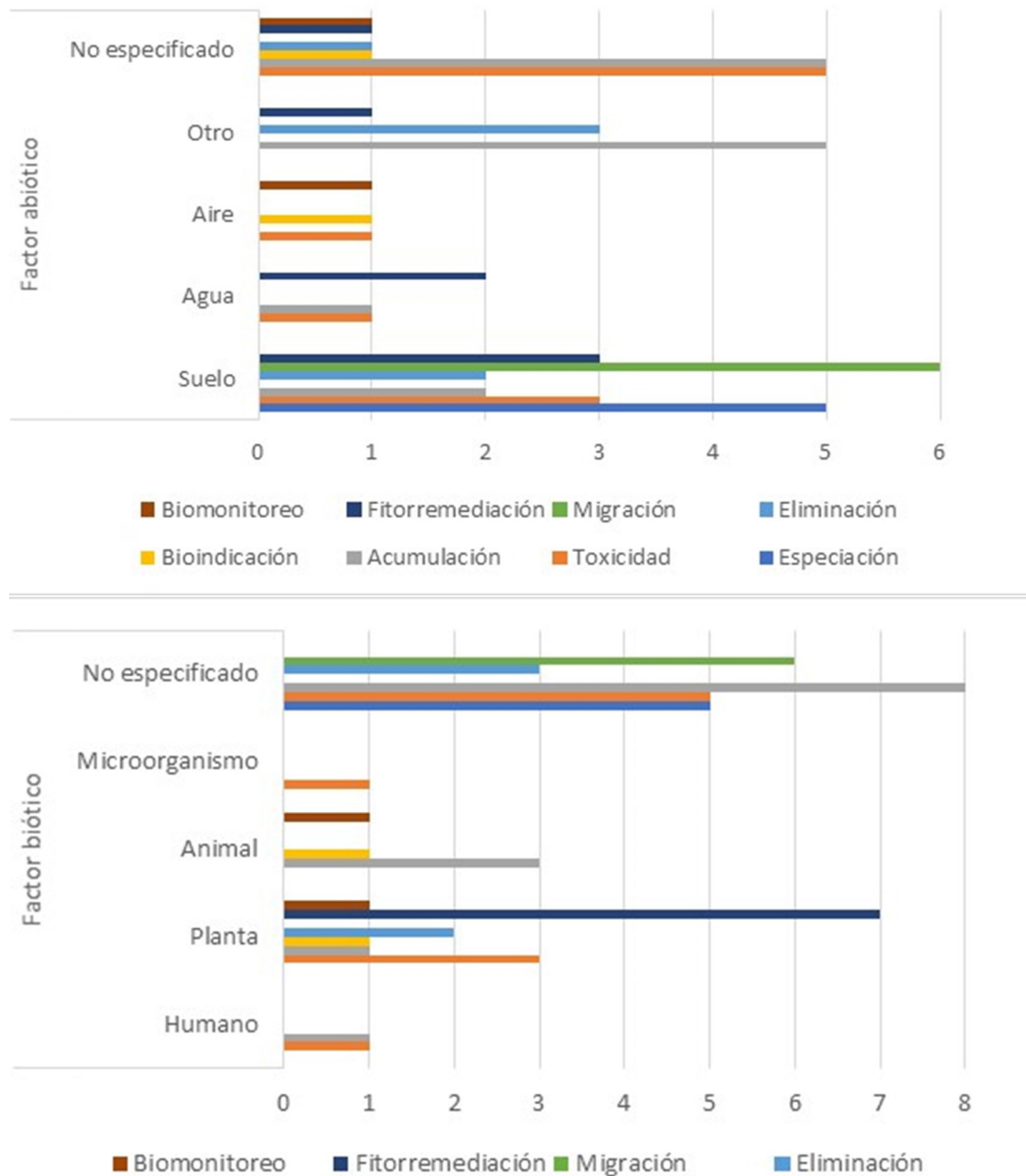


Figura 3. Frecuencia de los factores abióticos y biótico en cada ámbito.

Figure 3. Frequency of the element studied in each research area.

ción metales pesados o metaloides en tejidos vivos y muchos de ellos consideran valores de referencia, a razón de la contaminación, definidos en otros países u organizaciones internacionales (Zafra Mejía, et al., 2013; Herrera-Herrera et al., 2019). En Colombia existe una necesidad marcada de definir valores de referencia de contaminación en suelos con respecto a la concentración de metales pesados (Rueda-Saa et al., 2011). Por ejemplo, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, se establecieron valores de fondo y de referencia para los elementos Cd, Cr, Ni, Pb y Co (Marín-Pimentel et al., 2026), siendo la región pionera en este tipo de estudios. De igual modo, diversi-

ficar las investigaciones enfatizándolas en relacionar la actividad productiva de las personas en su grado de intoxicación por metales pesados similar al estudio realizado por Rodríguez Heredia (2017), en el cual se establece una relación entre la ocupación y la intoxicación por metales para algunos trabajadores.

En consideración a la limitada disponibilidad de recursos económicos en el país para la investigación ambiental. En este sentido, la evaluación de la contaminación con metales a través de la bioindicación o biomonitoring es un gran soporte para la comunidad científica. En Colombia en esta temática esta la investigación realizada por Ramírez Cardona et al.

(2008) utilizando plantas y el estudio con animales por Vergara Estupiñán y Rodríguez Africano (2015), pero es evidente que es necesario aumentar este tipo de investigaciones y diversificar los sitios con organismos vivos para la cuantificación (Tirado Amador et al., 2015), incluyendo a su vez los no vivos. Simultáneamente, una herramienta útil para analizar el impacto en ambiente por los metales pesados y metaloides es la evaluación del impacto ambiental EIA. Permitiendo cuantificar por un evento específico en los ecosistemas la transferencia y acumulación de estos elementos, debido a que integra información de la situación del ambiente en el momento de estudio, el evento mismo y la ponderación del impacto (Sánchez Duarte y Jara Marini, 2017).

Finalmente, en Colombia surge la necesidad de utilizar distintas técnicas para remediar o remover metales pesados o metaloides en ambientes bióticos o abióticos con la intención reducir o mitigar el impacto en salud humana. Para lograr la remoción de metales pesados del ambiente existen procesos fisicoquímicos, excavación y disposición en vertederos, incineración, utilización de solventes orgánicos, la biorreducción, uso de quelatantes, biorremediación, tolerancia y resistencia de los micrororganismos, plantas hiperacumuladoras o metalofitas, ingeniería genética entre otras (Beltrán Pineda y Gómez Rodríguez, 2015). Para reducir o remediar en el ambiente son utilizadas técnicas como la inmovilización química, uso de energía limpias, tratamiento de aguas residuales, límites de emisiones industriales y fitorremediación (Ziegler-Rivera et al., 2026). La importancia de remover o reducir estos elementos es por su toxicidad. En los organismos la manifestación de la toxicidad se asocia al periodo y nivel de exposición, forma y especificidad del metal, dinámica y cinética que tiene en el organismo el elemento, incluyendo la salinidad, el pH y la temperatura como factores fisicoquímicos

y en los biológicos los hábitos alimenticios, la talla, el sexo, la edad y la susceptibilidad de cada tejido y/o organismo (Sánchez Duarte y Jara Marini, 2017). La principal estrategia es evitar que llegue al ambiente el elemento nocivo, sin embargo, el uso de plantas que absorben y acumulan metales es una de las técnicas más usadas, las nuevas técnicas usan especies mejoradas o modificaciones genéticas en adiciones microbianas que aumenten su eficiencia, logrando en suelos contaminados recuperar metales (Ziegler-Rivera et al, 2026).

5. Conclusiones

Para cuantificar metales pesados en Colombia nos son precisos los criterios respecto a la importancia de cada técnica instrumental para cuantificar metales pesados y/o metaloides y las ventajas para utilizarla en diferentes ambientes. Es importante profundizar las investigaciones en temas relacionados con la salud pública, asociadas al tipo de labor que realizan los colombianos o el tipo de alimentación que consumen que permita relacionar la incidencia de los metales en las enfermedades que padecen.

Es necesario implementar normas que consideren límites permisibles de metales pesados y metaloides en ámbitos bióticos y abióticos que minimicen el riesgo a ambiente y la salud pública en todo el territorio. Profundizar la investigación en medios como el aire y agua, incluyendo análisis en los seres humanos y los animales. Seguir incluyendo análisis de toxicidad y acumulación de estos elementos en los organismos vivos a partir de estudios de bioindicación o biomonitorio. Además, enfatizar el estudio para los elementos As, Co, V y Al, sin desatender elementos como el Hg, Cd y Pb que tienen alto impacto en la salud pública.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira por el apoyo en la formación académica para estudios doctorales de la cual se deriva la presente investigación.

Contribuciones de los autores

- Gilberto Eduardo Marín Pimentel: conceptualización, investigación, metodología, validación, redacción - borrador original, redacción - revisión y edición.

Disponibilidad de datos

Los datos estarán disponibles previa solicitud.

Declaración de Uso de Inteligencia Artificial

El autor declara que NO se ha utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del manuscrito.

Implicaciones éticas

El autor declara que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

El autor declara que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Amador, J. (2010). Espectrometría óptica atómica. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 14(41), 3–10. <https://revistas.utm.mx/index.php/temas/es/issue/view/41>
- Arroyave, Q. C., Araque M, P., y Pelaez J, C. A. (2010). Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*). *Vitae, Revista de La Facultad de Química Farmaceutica*, 17(1), 45–49. <http://www.scielo.org.co/pdf/vitae/v17n1/v17n1a06.pdf>
- Barragan Moreno, O. L. (2008). Estudio de diferentes metodologías para determinar la biodisponibilidad de cadmio y arsénico en suelos y su relación con la concentración en plantas. *Nova*, 6(9), 35–39. <https://doi.org/10.22490/24629448.394>
- Beltrán Pineda, M. E., y Gómez Rodríguez, A. M. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *I3+*, 2(2), 82–112. <https://doi.org/10.24267/23462329.113>
- Beltrán-Pineda, M. E., y Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Bonilla, C. R., García, A., y Castillo, L. E. (1991). Adsorción de cadmio, cromo y mercurio en suelos del valle del cauca a varios valores de pH. *Acta Agronómica*, 41(1–4), 60–78. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/15505
- Bravo, I. del socorro., Arboleda, C., y Martín, F. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, 63(2), 164–174. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>
- Calao, C. R., y Marrugo, J. L. (2015). Efectos genotóxicos en población humana asociados a metales pesados en la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomédica*, 35(Sup2), 139–151. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2392>
- Camargo, J. C., Arias Morales, J. P., y Muñoz Paredes, D. (2015). Evaluación del contenido de mercurio en suelos y lechos de quebradas en la zona minera de Miraflores, Quinchía, Colombia Mercury content assessment in soils and stream-be in Miraflores zone, Quinchía, Colombia. *Acta Agronómica*, 64(2), 165–177. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n2.40639>
- Castañé, P. M., Topalián, M. L., Cordero, R. R., y Salibián, A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología*, 20(1), 13–18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4326429>
- Caviedes Rubio, D. I., Delgado, D. R., y Olaya Amaya, A. (2016). Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción + Limpia*, 11(2), 126–149. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a11>
- Chamorro, A. F., y Sánchez Andica, R. A. (2013). Estudio De La Adsorción De Plomo En Suelos De La Región Minera En El Distrito De Buenos Aires En El Departamento Del Cauca, Colombia. *Revista de Ciencias*, 16, 145–160. <https://doi.org/10.25100/rc.v16i0.510>
- Chaparro, S. P., Vargas Moreno, P. A., Silva Gómez, L. A., y Cárdenas, O. E. (2017). Cuantificación voltamétrica de Cadmio en chocolate de mesa producido en Chiquinquirá-Boyacá, Colombia. *Acta Agronómica*, 66(2), 172–177. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n2.58476>
- Cortes, L. E., Bravo Realpe, I. del S., Martín Peinado, F. J., y Menjivar Flores, J. C. (2015). Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos conta-Minados (andisol y vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agronómica*, 65(3), 232–238. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>
- Cortés, L. E., Bravo Realpe, I. del S., Martín Peinado, F. J., y Menjivar Flores, J. C. (2014). Adsorción de metales pesados en Andisoles, Vertisoles y Acidos Húmicos. *Acta Agronómica*, 64(1), 61–71. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n1.43677>
- Cortés, L. E., Martín Peinado, F. J., y Sarria Carabalí, M. M. (2017). Evaluación de la toxicidad de metales pesados en dos suelos agrícolas de Colombia mediante bioensayos. *Temas Agrarios*, 22(2), 43–53. <https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.943>
- Díaz Zamora, R. (2017). Ventajas y desventajas del análisis por ICP – MS de metales pesados en muestras biológicas. *Boletín Institucional Instituto Nacional de Salud*, 23(8), 54–63. <https://hdl.handle.net/20.500.14196/1011>
- Domínguez, M. C., Gómez S, S., y Ardila A, A. N. (2016). Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia*, 22(1), 227–237. <http://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705/1075>
- Doria Argumedo, C. (2017). Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 46(2), 37–44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309051244004>
- Doria Argumedo, C., y Deluque Viloria, H. (2015). Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 123. <https://doi.org/10.22490/21456453.1268>
- Doria Mesquidaz, E., Marrugo Negrete, J., y Pinedo Hernández, J. (2013). Exposure to mercury mine workers of gold in northern Colombia. *Revista Salud Uninorte*, 29(3), 534–541. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522013000300013
- Estévez, J., Andrade, M., Marcet, P., y Montero, M. (2000). Fijación y movilidad de cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. *Ciencia del Suelo*, 18(1), 28–35. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4382471>
- Estrada-Guerrero, D. M., y Soler-Tovar, D. (2014). Las aves como bioindicadores de contaminación por metales pesados en humedales. *Ornitología Colombiana*, 14, 145–160. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10208453>
- Estupiñan, A., Sarmiento, D., y Belalcázar de Galvis, A. M. (1998). Remoción de Cobre y Níquel por intercambio catiónico con una zeolita natural. *Revista Colombiana de*

- Química*, 27(1), 31–39. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/16823>
- Filipoiu, D. C., Bungau, S. G., Endres, L., Negru, P. A., Bungau, A. F., Pasca, B., Radu, A.-F., Tarce, A. G., Bogdan, M. A., Behl, T., Nechifor, A. C., Hassan, S. S. ul, y Tit, D. M. (2022). Characterization of the Toxicological Impact of Heavy Metals on Human Health in Conjunction with Modern Analytical Methods. *Toxics*, 10(12), 716. <https://doi.org/10.3390/toxics10120716>
- Flores, J. C. M., Ortiz, M. D., Ruiz, J. A., Peinado, F. M., y Fernández, I. G. (2009). Estudio de metales pesados y arsénico en los suelos de olivar de Sierra Mágina, Jaén (España). *Acta Agronómica*, 58(4), 303–307. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9428923>
- Flórez Orjuela, Y., y Cotes Cuadro, Á. (2006). Bioabsorción de metales pesados por *Salvinia natans* de los lixiviados del relleno sanitario Combeima de Ibagué. *Tumbaga*, 1, 89–100. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3630810>
- Forero Hernández, A., y Ballesteros González, M. I. (2004). Especiación química de metales pesados en suelos incubados con lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de aguas. *Revista Colombiana de Química*, 33(2), 127–137. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/22250>
- Fuentes Gándara, F., Pinedo Hernandez, J., y Marrugo Negrete, J. (2018). Metales pesados en especies ícticas de la ciénaga de Mallorquín, Colombia. *Espacios*, 39(3), 1–12. <https://hdl.handle.net/11323/1225>
- García-Céspedes, C. D., Lima-Cazorla, C. L. A., Ruiz-Gutiérrez, C. L., Santana-Romero, C. J. L., y Calderón-Peñalver, P. A. (2016). Agroecosistemas con probables riesgos a la salud por contaminación con metales pesados. *Revista Cubana de Química*, 28(1), 378–393. <https://www.redalyc.org/comocitar.oi?id=443543743004>
- Guerra, F., Trevizam, A. R., Muraoka, T., Marcante, N. C., y Canniatti-Brazaca, S. G. (2012). Heavy metals in vegetables and potential risk for human health. *Scientia Agricola*, 69(1), 54–60. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000100008>
- Hernández, L. V., Duarte, M., y Marciales, C. (2001). Evaluación de plomo en el ambiente ocupacional de una industria de baterías. *Revista Colombiana de Química*, 30(1), 7–15. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/22276>
- Herrera-Herrera, C., Fuentes-Gandara, F., Zambrano-Arévalo, A., Higueta, F. B., Hernández, J. P., y Marrugo-Negrete, J. (2019). Health risks associated with heavy metals in imported fish in a coastal city in Colombia. *Biological Trace Element Research*, 190(2), 526–534. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1561-1>
- Insuasty, L., Burbano Orejuela, H., y Menjivar, J. C. (2008). Dinámica del cadmio en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 57(1), 51–54. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/1054
- Insuasty B., J., Burbano O., H., y Menjivar F., J. (2006). Movilidad del cadmio en suelos cultivados con trigo en Tangua, Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 55(2), 29–32. http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/214/533
- Jiménez Heinert, M. E., Grijalva Endara, A. de las M., y Ponce Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *Recimundo*, 4(4), 4–12. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)
- Kamran, S., Shafaqat, A., Samra, H., Sana, A., Samar, F., Muhammad, B. S., Saima, A. B., y Hafiz, M. T. (2013). Heavy metals contamination and what are the impacts on living organisms. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 2(4), 172–179. <https://doi.org/10.15580/GJEMPS.2013.4.060413652>
- Kelepertzis, E. (2014). Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece. *Geoderma*, 221(222), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.007>
- Lara-Trejo, Z., y Gaytán-Oyarzun, J. C. (2025). Metales pesados y metaloides de interés toxicológico en el estado de Hidalgo, México. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 12(24), 9–17. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i24.12021>
- Laza-Durante, M., Urango-Cárdenas, I., Enamorado-Montes, G., Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J., Paternina-Urbe, R., y Peroza-Sierra, J. (2025). Acumulación de mercurio en variedades criollas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivadas en suelos de la región de La Mojana, Colombia. En R. J. Paternina Uribe, J. L. Marrugo Negrete, y A. E. Navarro Frómata (eds.), *Sistema acuífero La Mojana: elementos para la gestión integral del recurso hídrico* (Cap. 7, pp. 134–148). Universidad de Córdoba; Fondo Editorial Remington. <https://doi.org/10.22209/9786289630572.C7>
- Leyte-Vidal, J. J., González-Fernández, L. A., Gutiérrez-Artiles, O., Márquez Llauger, L., y Alfonso del Cristo, T. (2019). Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados. *Revista Cubana De Química*, 31(2), 293–308. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4902>
- Londoño, L. F., Londoño Muñoz, P. T., y Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Lora Silva, R., y Bonilla Gutiérrez, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 61–70. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.730>
- Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E., y Solarte-Soto, J. (2014). Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 179–188. <https://doi.org/10.25100/iyv.v16i2.3693>
- Madero, A., y Marrugo, J. (2011). Detección de metales pesados en bovinos, en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, departamento de Córdoba. *Revista MVZ Córdoba*, 16(1), 2391–2401. <https://revistamvz.unicordoba.edu.co/article/view/298/366>
- Mahecha Pulido, J. D., Trujillo González, J. M., y Torres Mora, M. A. (2017). Análisis de estudios en metales pesados en zonas agrícolas de Colombia. *Orinoquia*, 21(1 Sup), 83–93. <https://doi.org/10.22579/20112629.434>
- Mahecha-Pulido, J. D., Trujillo-González, J. M., y Torres-Mora, M. A. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, 19(1), 118–122. <https://doi.org/10.22579/20112629.345>

- Marín-Pimentel, G. E., Rueda-Saa, G., y Menjivar-Flores, J. C. (2026). Background levels and reference values for metals and metalloids in agricultural soils in an inter-Andean valley in Colombia. *Acta Agronómica*, 74(2), 161–170. <https://doi.org/10.15446/acag.v74n2.123617>
- Martínez, Z., González, M. S., Paternina, J., y Cantero, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Córdoba-Colombia. *Temas Agrarios*, 22(2), 20–32. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/941/1403>
- Mazarakioti, E. C., Zotos, A., Thomatou, A. A., Kontogeorgos, A., Patakas, A., y Ladavos, A. (2022). Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS), a useful tool in authenticity of agricultural products' and foods' origin. *Foods*, 11(22), 3705. <https://doi.org/10.3390/foods11223705>
- Navarro Martínez, A., Sanjuan-Muñoz, A., Almario-García, M., Santos Vasquez, N., Campos-Campos, N. H., y Vélez-Mendoza, A. (2025). Contaminación en sedimentos por metales (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni y Pb) en el Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 54(1), 153–171. <https://doi.org/10.25268/bimc.inve-mar.2025.54.1.1346>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2013). *Guía breve de métodos analíticos de plomo en la sangre*. OMS. <https://www.who.int/es/publications/i/item/10665-333914>
- Ortega, M. (2014). Niveles de plomo y mercurio en muestras de carne de pescado importado y local. *Pediatría*, 47(3), 51–54. [https://doi.org/10.1016/s0120-4912\(15\)30135-x](https://doi.org/10.1016/s0120-4912(15)30135-x)
- Ortiz Villa, A. Y., Araque Marín, P., y Peláez Jaramillo, C. A. (2016). Cuantificación de mercurio en pasto tratado con biosólidos por espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros. *Revista EIA*, 13(24), 147–155. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i25.1023>
- Ortiz-Romero, L. T., Delgado-Tascón, J. G., Pardo-Rodríguez, D. A., Murillo-Perea, E., y Guio Duque, A. J. (2015). Determinación de metales pesados e índices de calidad en aguas y sedimentos del río Magdalena – tramo Tolima, Colombia. *Revista Tumbaga*, 2(10), 43–60. <https://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/1092>
- Pabón Guerrero, S. E., Benítez Benítez, R., Sarria Villa, R. A., y Gallo Corredor, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Peláez, M., Casierira-Posada, F., y Torres, G. A. (2014). Toxicidad de cadmio y plomo en pasto tanner (*Brachiaria arrecta*). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 3–13. <https://doi.org/10.22267/rcia.143102.27>
- Peláez-Peláez, M.-J., Bustamante-Cano, J.-J., y Gómez-López, E.-D. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de brachiaria en el Magdalena Medio colombiano. *Luna Azul*, 43, 82–101. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.5>
- Perez Mora, W. H. (2021). Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. *Revista ION*, 34(1), 37–45. <https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021004>
- Prieto-Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., y Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y aguas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29–44. www.lareferencia.info/vufind/Record/MX_18fb5ac08330b266ddd01f1d7b610dc5/Details
- Racero-Casarrubia, J., Pinedo-Hernández, J., Ballesteros-Correa, J., y Marrugo-Negrete, J. (2017). Metales pesados en especies de murciélagos (quiróptera) asociados a una finca bajo manejo silvopastoril en el departamento de Córdoba, Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 45–54. <https://doi.org/10.21829/azm.2017.3311012>
- Ramírez Cardona, M., Oviedo L, J., Salazar M, S., y Giraldo A, W. (2008). Biomonitoring de metales pesados empleando herramientas de SIG en el valle del Aburra. *Investigaciones Aplicadas*, 3, 7–14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2884759>
- Ramírez Franco, J. H., y Enríquez Enríquez, M. K. (2015). Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del pseudotallo de plátano. *Acta Agronómica*, 64(3), 209–213. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n3.43488>
- Ramírez Niño, M. Á., y Navarro Ramírez, M. Á. (2015). Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. *Ciencia en Desarrollo*, 6(2), 167–176. <https://doi.org/10.19053/01217488.3787>
- Ramírez Pisco, R., Giraldo Jiménez, D., y Barrera Cruz, D. (2018). Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) en suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 67(3), 420–424. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n3.68536>
- Reinaldo, I., Rodríguez, R., Pierre, I. G., Izquierdo, C. F. G., y Carmenate, C. R. V. (2014). Disponibilidad de metales pesados en suelos Ferralíticos con baja actividad antrópica en San José de las Lajas, Mayabeque. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 37–40. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/302>
- Reyes Guzmán, M., y Avendaño Prieto, G. (2012). Estudio ambiental sobre el riesgo ecológico que representa el plomo presente en el suelo. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (72), 66–75. <https://doi.org/10.21158/01208160.n72.2012.568>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lago, M., y González-Jimenez, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Ríos Álzate, M. L. L., y Torres Pérez, D. (2009). Determinación de metales pesados por métodos analíticos en residuos de sulfato de zinc producidos en un laboratorio de química. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 5, 9–29. <https://doi.org/10.31908/19098367.765>
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12), 7003. <https://medisan.sld.cu/index.php/san/article/view/1089>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9183es>
- Rueda-Saa, G., Marín-Pimentel, G. E., y Menjivar-Flores, J. C. (2025). Baseline concentration of heavy metals in agricultural soils. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 42(2), e2259. <https://doi.org/10.22267/rcia.20254202.259>
- Rueda-Saa, G., Rodríguez Victoria, J. A., y Madriñán Molina, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*, 60(3), 203–218. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122011000300001

- Ruiz Chaves, I. (2016). Metodologías analíticas utilizadas actualmente para la determinación de mercurio en músculo de pescado. *Pensamiento Actual*, 16(26), 113–121. <https://doi.org/10.15517/pa.v16i26.25187>
- Sánchez Duarte, N. E., y Jara Marini, M. E. (2017). Evaluación de impacto ambiental por metales y metaloides. *Biotecnía*, 19(1), 10–16. <https://doi.org/10.18633/biotecnía.v19i1.363>
- Sarria Carabalí, M. M., Cortés Páez, L. E., y Martin Peinado, F. J. (2014). Evaluación de la recuperación de suelos contaminados por el vertido de Aznalcóllar. *Acta Agronómica*, 64(2), 156–164. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n2.44265>
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., y Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>
- Skoog, D., Holler, F., y Nieman, T. (2001). *Principios de Análisis Instrumental* (5ª ed.). Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- Tirado Amador, L. R., González Martínez, F. D., Martínez Hernández, L. J., Wilches Vergara, L. A., y Celedón Suárez, J. N. (2015). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. *Revista Nacional de Odontología*, 11(21), 83–98. <https://doi.org/10.16925/od.v11i21.895>
- Vargas Licon, S. P., y Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232–242. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>
- Vargas Mendoza, L. A., Buitrago González, M. E., y Villegas Méndez, L. C. (2024). Contaminación de alimentos por plomo en Colombia y tecnologías para su manejo ambiental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 247–279. <https://doi.org/10.22490/21456453.7273>
- Vergara Estupiñán, E. J., y Rodríguez Africano, P. E. (2015). Presencia de mercurio, plomo y cobre en tejidos de Oreochromis. *Producción + Limpia*, 10(2), 114–126. <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/5746944>
- Wilschefski, S., y Baxter, M. (2019). Inductively coupled plasma mass spectrometry: introduction to analytical aspects. *Clinical Biochemist Reviews*, 40(3), 115–133. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>
- Zafra Mejía, C. A., Peña Valbuena, N. Á., y Álvarez Prieto, S. (2013). Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá - Soacha. *Revista Tecnura*, 17(37), 99–108. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.3.a09>
- Zafra Mejía, C. A., Santamaria Galindo, D. M., y Torres Galindo, C. D. (2015). Análisis climático de la concentración de metales pesados asociados al sedimento depositado sobre vías urbanas. *Revista de Salud Pública*, 17(3), 351–364. <https://doi.org/10.15446/rsap.v17n3.46672>
- Ziegler-Rivera, F. R. A., Avilés-Junco, C., Lopera-Gasca, A. C., y Prado-Pano, B. L. (2026). Metales pesados, ¿amigos o enemigos? una mirada desde la salud, el ambiente y las actividades humanas. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, 5(1), 105. <https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2026.5.1.105>