

Cuantificación de dos metales pesados: plomo (Pb) y zinc (Zn) mediante espectroscopia de absorción atómica en dos tipos de suelos (zona protegida y zona agrícola) en Costa Rica

Priscilla Rojas Alvarado

David Mora Elizondo

Joshua Sánchez Céspedes

DOI: <https://doi.org/10.15517/mm2zdy08>

¿Cómo citar este artículo?

Rojas Alvarado, P., Mora Elizondo, D. y Sánchez Céspedes, J. (2025).
Cuantificación de dos metales pesados: plomo (Pb) y zinc (Zn) mediante
espectroscopia de absorción atómica en dos tipos de suelos (zona protegida y
zona agrícola) en Costa Rica. *Revista InterSedes* 26(54).
<https://doi.org/10.15517/mm2zdy08>

Cuantificación de dos metales pesados: plomo (Pb) y zinc (Zn) mediante espectroscopia de absorción atómica en dos tipos de suelos (zona protegida y zona agrícola) en Costa Rica

Quantification of two heavy metals: lead (Pb) and zinc (Zn) by atomic absorption spectroscopy in two types of soils (protected zone and agricultural zone) in Costa Rica

Priscilla Rojas Alvarado

Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente | San Ramón, Alajuela, Costa Rica
priscilla.rojasalvarado@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5640-3640>

David Mora Elizondo

Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente | San Ramón, Alajuela, Costa Rica
david.moraelizondo@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0003-8010-6373>

Joshua Sánchez Céspedes

Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente | San Ramón, Alajuela, Costa Rica
joshua.sanchezcspedes@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-9150-7732>

Resumen

El objetivo de este estudio fue cuantificar dos metales pesados, plomo (Pb) y zinc (Zn), e indagar en el potencial impacto ambiental que estos pueden llegar a provocar. El ensayo se realizó analizando suelos en la Zona Protectora El Chayote y en un terreno de uso agrícola aledaño, usado específicamente para el cultivo de café; ambos sitios están en los cantones de Naranjo y Zarcero en Costa Rica. El estudio y cuantificación de los metales pesados se realizó mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica, con una digestión como etapa previa en el tratamiento de las muestras. Se encontró la presencia de Zn (desde 62 ± 1 mg/kg hasta 87 ± 1 mg/kg) en las muestras analizadas en la zona agrícola, mientras que para la zona protectora se obtuvieron valores entre 10 ± 1 mg/kg y 47 ± 1 mg/kg. Con respecto al Pb, en el suelo en

Abstract

The objective of this study was to quantify heavy metals (Pb and Zn) and investigate their potential environmental impact. The study was conducted by analyzing soils in the El Chayote Protected Zone and on an adjacent agricultural plot, specifically used for coffee cultivation, located in the cantons of Naranjo and Zarcero in Costa Rica. The study and quantification of heavy metals were performed using atomic absorption spectroscopy, with digestion as a preliminary step in sample treatment. Zinc was found in the samples analyzed in the agricultural zone (ranging from 62 ± 1 mg/L to 87 ± 1 mg/L), while values from the protected zone ranged from 10 ± 1 mg/L to 47 ± 1 mg/L. Lead was not quantified in the soil of the protected zone. It should be noted that the reported values did not exceed Regulation No. 37757-S

la zona protectora no se cuantificó, mientras que en la zona cafetalera se obtuvieron valores entre $4,4 \pm 0,1$ mg/kg y $8,8 \pm 0,1$ mg/kg. Cabe destacar que los valores reportados no sobrepasaron el Reglamento N° 37757-S (450 Zn mg/kg de suelo seco y 180 Pb mg/kg de suelo seco).

Palabras clave: metales pesados, zona protegida, zona agrícola, absorción atómica, contaminación ambiental.

(450 Zn mg/kg of dry soil and 180 Pb mg/kg of dry soil)

Palabras clave: heavy metals, protected zone, agricultural zone, atomic absorption, environmental contamination.

Fecha de recepción: 10/4/2024 * Fecha de aceptación: 26/10/2025

Introducción

El suelo es un cuerpo natural compuesto por organismos vivos, material orgánico e inorgánico que interactúa con agua y aire (Meléndez y García, 2011). Este componente es de sumo interés para la producción de alimentos, ya que, de forma directa o indirecta, del suelo depende el 95% de la generación de estos (Burbano-Orjuela, 2016). Sin embargo, no solamente se aprovecha la producción de cultivos, sino la obtención de materias primas requeridas por la población mundial (Burbano-Orjuela, 2016).

Las características físicas y químicas del suelo pueden variar según la época del año en que este se analice (Hernández et al., 2014), por lo que debe tomarse en cuenta este factor según la finalidad del estudio que se desee realizar. Vallejo (2013) indica que la calidad del suelo se asocia con la capacidad de su funcionamiento, esto dentro de un ecosistema natural o antrópico; para sostener o mejorar la productividad animal o vegetal; para mantener y controlar la habitabilidad y salud del hombre.

En cuanto a la presencia de metales pesados en el suelo, estos pueden tener su origen por causas naturales y antropogénicas, tales como desechos industriales, emisión de gases de automóviles y prácticas agronómicas (Arévalo et al., 2016). Además, según las características del suelo, tales como el nivel de pH, materia orgánica y altas concentraciones de otros nutrientes, pueden modificarse la movilidad y disponibilidad de los metales pesados y así dar un aumento o disminución de la toxicidad de estos componentes (Arévalo et al., 2016).

El riesgo de la presencia de metales pesados en suelo es alto, debido a que existe la posibilidad de que sean trasladados a las plantas de la zona y se lixivien, lo que contaminaría las aguas subterráneas (Mendoza et al., 2021). Adicionalmente, puede tener consecuencias como la inhibición del crecimiento y desarrollo de la vegetación, ya que esta puede absorber dichas sustancias y retenerlas en sus tejidos, en donde, a concentraciones muy elevadas, llegan a ser tóxicas. Esas cantidades de metales pesados, asimismo, pueden llegar a la cadena alimentaria humana debido al consumo de plantas contaminadas (Vargas, 2016).

El plomo (Pb) y el zinc (Zn) se encuentran entre los metales pesados de mayor relevancia ambiental debido a sus efectos sobre los suelos y los organismos vivos. El Pb puede ser absorbido por las capas inferiores del suelo, mezclarse con el agua y ser recolectado por las raíces de las plantas, lo que afecta directamente su desarrollo. Así, resulta indispensable regular sus concentraciones y controlar sus fuentes de origen, como el uso de fertilizantes que lo contengan (Chele y Shigla, 2023). Por su parte, el Zn, aunque es un elemento esencial para plantas y animales, presenta un comportamiento químico variable en el suelo: puede formar compuestos insolubles, pero también volverse altamente móvil en condiciones de pH ácido o neutro, lo que aumenta el riesgo de toxicidad. Aunque cumple un papel fundamental para las plantas en cuanto a la síntesis de ácidos nucleicos, su exceso puede interferir con la absorción de otros nutrientes

esenciales, como el hierro y el magnesio, y alterar el metabolismo vegetal y la cadena alimentaria humana (Chele y Shigla, 2023; Amezcua y Lara, 2017). Es importante mencionar que algunos plaguicidas, como el Mancozeb, poseen alrededor de un 2,5% de Zn en su composición (Méndez et al., 2013), por lo que la presencia de este metal en el suelo podría asociarse con el uso de estos productos.

Para la determinación de Pb y Zn en muestras de suelo se puede emplear la técnica de espectroscopía de absorción atómica, cuyo principio se basa en la interacción de la radiación electromagnética con los átomos del analito. En este método, la muestra es sometida a un aporte controlado de energía que provoca la excitación de los electrones de los elementos de interés. Cada elemento químico absorbe radiación a una longitud de onda específica y característica, lo que permite su identificación. Cuando los electrones excitados retornan a su estado basal, se produce la absorción de radiación monocromática, la cual es registrada como un valor de absorbancia. De acuerdo con la Ley de Beer-Lambert, dicha absorbancia es directamente proporcional a la concentración del analito, lo que permite la cuantificación precisa del Pb y el Zn presentes en la muestra de suelo (Mohd et al, 2019; Chele y Shigla, 2023)

En el presente estudio se analizaron las concentraciones de los metales mencionados en dos tipos de suelos: uno proveniente de una zona protegida y otro de uso agrícola. En el caso de las zonas protectoras, estas corresponden a las áreas silvestres protegidas, definidas como espacios geográficos designados y clasificados de acuerdo con su relevancia natural, cultural y socioeconómica, con el fin de cumplir objetivos de conservación como la protección del suelo, la regulación del régimen hidrológico, la conservación del ambiente y la preservación de las cuencas hidrográficas (Ley de Biodiversidad, 1998). Estas áreas desempeñan un papel fundamental en la protección de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, al servir como hábitats para numerosas especies y apoyar los medios de vida locales mediante prácticas sostenibles de gestión de recursos (Ley de Biodiversidad, 1998; Cebrián-Piqueras et al., 2020). A su vez, los suelos de uso agrícola se contemplaron en este estudio debido a que tienen un papel fundamental en la producción de alimentos (Burbano-Orjuela, 2016), y la exposición constante a prácticas agrícolas, como la aplicación de fertilizantes, enmiendas y agroquímicos, puede introducir metales pesados al sistema suelo-planta (Jolly et al., 2013). Estos mismos autores indican que “la acumulación de metales pesados y metaloides en los suelos de uso agrícola es motivo de creciente preocupación en la actualidad” (p. 1).

Duarte (2013) indica que es frecuente hallar niveles elevados de metales pesados, como el Pb, en suelos agrícolas de uso intensivo. Esto se debe a la posible acumulación de metales pesados a raíz del uso de fertilizantes químicos fosfatados; además, otros agroquímicos, como los pesticidas, pueden contener arseniato de Pb, y han sido empleados durante años para combatir insectos parásitos en distintos cultivos y plantaciones, como la del café. Por estas razones, el análisis de los metales pesados en suelos es esencial

para evaluar posibles riesgos de contaminación; además, garantiza la calidad del suelo para proteger la salud humana y prevenir la transferencia de los metales pesados en la cadena alimentaria.

Considerando lo dicho, el objetivo del presente estudio fue identificar y cuantificar la presencia de dos metales pesados, específicamente Zn y Pb, en la Zona Protectora El Chayote y en un terreno agrícola aledaño mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con el Reglamento sobre valores guía en suelos para descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames (N° 37757-S) y evaluar el impacto ambiental que estos metales pesados pueden provocar, el grado de contaminación que pueden generar y su posible amenaza para la biodiversidad local.

Metodología

Zonas de estudio

Zona Protectora El Chayote: se encuentra en el área de conservación central de Costa Rica, concretamente en los cantones de Naranjo (83 %) y Zarcero (17 %), tiene una elevación de 1500 a 2184 m s. n. m., las coordenadas específicas de la zona son 10°11'07"N 84°20'51"O. El cerro Palmira es su punto más alto, el suelo de este sitio es producto de la meteorización de materiales emanados por los edificios volcánicos adyacentes y es importante conservarlos como sustrato para procesos de regeneración natural (SINAC, 2019).

Zona agrícola: se encuentra aledaño a la Zona Protectora El Chayote, igualmente entre los cantones de Naranjo y Zarcero, las coordenadas específicas de esta zona son 10°10'24.6"N 84°23'10.1"O. La zona que se seleccionó es específicamente de cultivo de café, esto con la finalidad de poder contrastar las diferencias que se encuentran en el suelo proveniente de una zona protectora y el suelo que se utiliza para el cultivo de ese grano.

Recolección y condiciones de traslado de la muestra de suelo

Para la recolección y condiciones de traslado y almacenamiento de las muestras de suelo se utilizaron las metodologías propuestas por Andrade et al. (2020) y Mendoza et al. (2021), las cuales consisten en que, en cada punto seleccionado, se deben tomar muestras disturbadas de suelo a profundidades dentro del rango de 0-20 cm, con tres repeticiones para cada zona (protegida y agrícola). Se aplica el método de zigzag, de acuerdo con la guía para el muestreo de suelos utilizada por Andrade et al. (2020). Posteriormente, las muestras de suelo se toman en bolsas de plástico normadas (o bolsas "Ziploc") cerradas herméticamente y se llevan al laboratorio para ser analizadas.

En la siguiente figura se muestran las zonas de muestreo de esta investigación.

FIGURA I

Zonas de muestreo del estudio



Nota. (a) Zona de muestreo correspondiente al área protegida; (b) Zona de muestreo correspondiente al cultivo de café (cafetal).

Tratamiento de la muestra de suelo

Para el tratamiento de las muestras, se utilizó la metodología propuesta por Andrade et al. (2020), en la que se menciona que las muestras deben someterse a un proceso riguroso de digestión ácida previo al análisis, para obtener una solución completa de los analitos y la descomposición total de la muestra evitando la pérdida o contaminación de esta. Además, con ello se reducen las interferencias en resultados debido a la presencia de materia orgánica. Para esto, se utiliza una mezcla digestiva de agua regia, la cual consiste en una mezcla de HNO_3 y HCl en proporción 3:1, según la metodología de García et al. (2006).

Considerando lo dicho, se tomó una cantidad representativa de la muestra (aproximadamente 100 g), se colocó en una placa de Petri y se llevó a una estufa a 105 °C hasta peso constante. Previo al secado, se retiró de la muestra cualquier componente ajeno al suelo y/o sedimento, como fracciones de roca de tamaño superior a 2 mm, así como hojas, tallos y raíces (Medina, 2017). Posteriormente, la muestra fue molida, tamizada y homogeneizada (esta última operación, de ser necesario, puede ser realizada en mortero). Finalizado dicho procedimiento, la muestra se colocó en un desecador hasta su digestión (Medina, 2017).

Se realizó la digestión de 0,3g a 1g de muestra mediante un sistema abierto y con calentamiento, donde se agregaron 10 mL de la solución digestora y se dejó digerir hasta que no se produjeran más humos (Medina, 2017). Posteriormente, una vez realizadas las digestiones se filtraron sobre papel Whatman grado 42, se diluyeron con 50 mL de agua desionizada y se refrigeraron hasta su análisis (Andrade et al. 2020).

Determinación del metal pesado

Para llevar a cabo el análisis, identificación y cuantificación del metal pesado en las muestras de suelo, se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Thermofisher, utilizando las especificaciones mostradas en la Tabla 1 y Tabla 2. Para esto, se estableció una curva de calibración con concentraciones del rango de 0,5 ppm a 3 ppm. Se prepararon seis disoluciones patrones de Pb y Zn, con concentraciones que iban de 0,5 ppm en 0,5 ppm.

Luego, se analizó la muestra, la cual se encontraba en el balón de 50 mL, y se determinó si era necesario realizar un proceso de dilución o no, con el fin de que la magnitud de absorbancia se encontrara dentro de la curva de calibración realizada. De ser necesaria una dilución, se realizó tomando una alícuota y depositándola en un balón aforado (el cual se aforó con agua destilada).

TABLA 1

Condiciones instrumentales para la determinación de Pb en las muestras de suelos

Condiciones instrumentales		
Espectrofotómetro ThermoFisher	Longitud de onda: 217 nm	
Tipo de lámpara	Lámpara de cátodo hueco, Pb	
Tipo de llama	Combustible Acetileno C ₂ H ₂	Oxidante Aire

Nota. Elaboración propia a partir de Moya y Quezada (2022)

TABLA 2

Condiciones instrumentales para la determinación de Zn en las muestras de suelos

Condiciones instrumentales		
Espectrofotómetro ThermoFisher	Longitud de onda: 214 nm	
Tipo de lámpara	Lámpara de cátodo hueco, Zn	
Tipo de llama	Combustible Acetileno C ₂ H ₂	Oxidante Aire

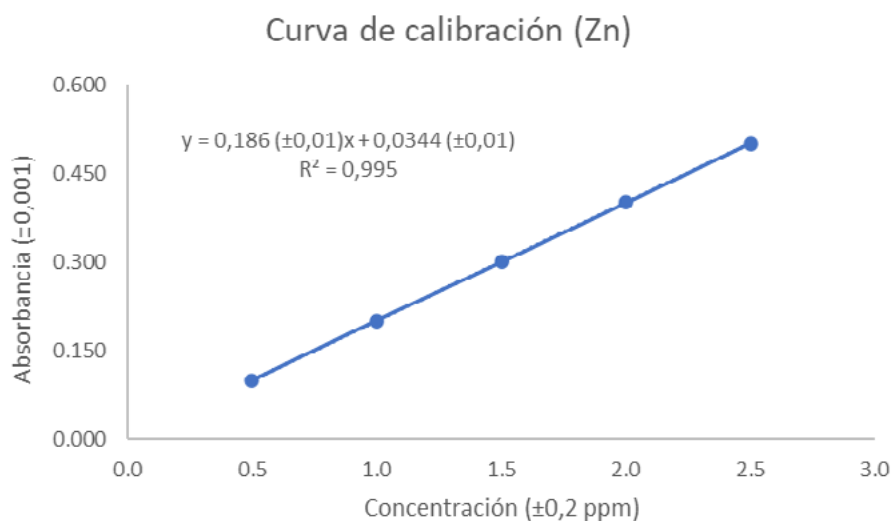
Nota. Elaboración propia a partir de ThermoScientific (2018)

Resultados

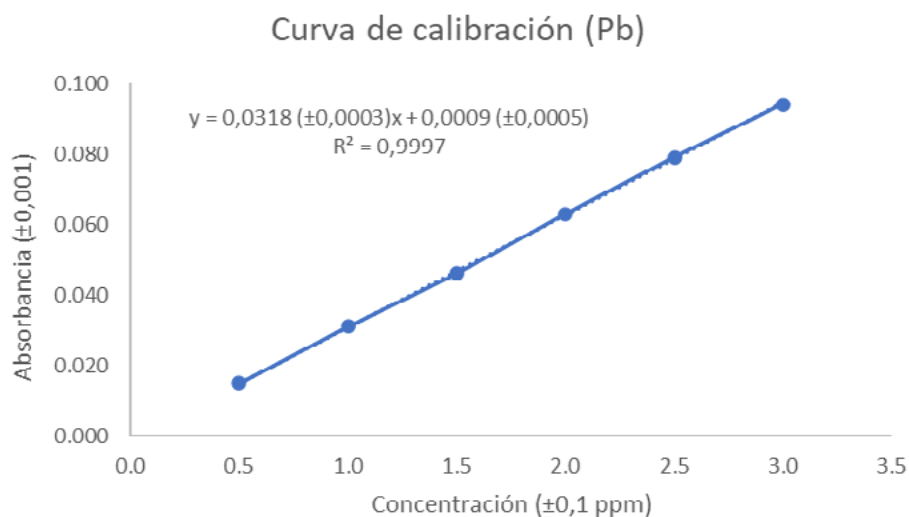
En el siguiente apartado se encuentran los datos obtenidos experimentalmente al analizar suelos provenientes de dos lugares, la zona protegida El Chayote y la zona de cultivo de café (cafetal) aledaña, con la técnica analítica de espectroscopia de absorción atómica. En la [Figura 2](#), se observan las curvas de calibración obtenidas en los análisis; seguidamente, en la [Tabla 3](#), se presentan los valores de absorbancias y concentraciones obtenidas para las dos zonas de estudio, así como de los dos metales analizados.

FIGURA 2

Curvas de calibración obtenidas



(a)



Nota. (a) Curva de calibración obtenida a partir de los patrones de Zn; (b) Curva de calibración obtenida a partir de los patrones de Pb. Elaboración propia.

TABLA 3

Resultados obtenidos en el análisis de suelos de un cafetal y de una zona protegida (El Chayote)

Muestra	Absorbancia Zn (±0,001)	Zn mg/kg de suelo seco (±1)	Absorbancia Pb (±0,001)	Pb mg/kg de suelo seco (±0,1)
Cafetal 1	1,051	87	0,019	8,8
Cafetal 2	0,895	73	0,015	7,0
Cafetal 3	0,787	62	0,009	4,4
El Chayote 1	0,222	16	ND ³	ND ³
El Chayote 2	0,156	10	ND ³	ND ³
El Chayote 3	0,585	47	ND ³	ND ³
Valor reglamentario máximo ¹	NA ²	450	NA ²	180

Nota. ¹Según el Reglamento sobre valores guía en suelos para descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames (N° 37757-S).

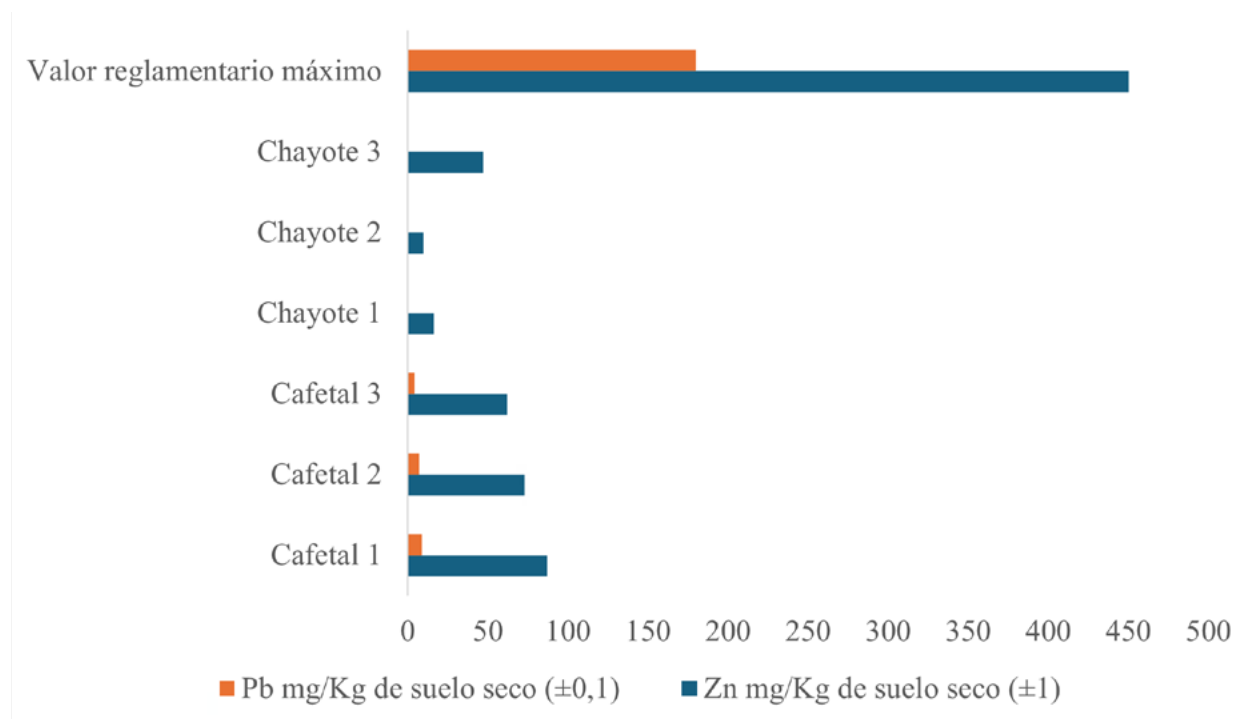
²No aplica. ³No detectable.

Elaboración propia.

En la tabla anterior, se pueden observar los valores obtenidos para los metales Zn y Pb en las muestras de suelo de las zonas de estudio. Se resalta que, para la Zona Protectora El Chayote, no se detectó la presencia del Pb en las muestras de suelo, mientras que en las muestras del cafetal sí se pudo detectar. Continuando, estas concentraciones se pueden observar también en la [Figura 3](#), donde se denota el contraste de las concentraciones obtenidas para el metal Zn en las dos zonas de estudio.

FIGURA 3

Valores obtenidos de Pb y Zn en las zonas de estudio



Discusión

Con respecto al análisis de las muestras de suelos provenientes de dos lugares distintos (zona protegida El Chayote y cafetal), se logró cuantificar la concentración de los analitos Zn y Pb presente en dichas

muestras (Tabla 3). En cuanto a la concentración de Zn obtenida, mediante la técnica realizada se evidencia que las magnitudes van de 10 (± 1) mg/kg de suelo seco (El Chayote 2) hasta 87 (± 1) mg/kg de suelo seco (Cafetal 1). Según el Reglamento N° 37757-S sobre valores guía en suelos para descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames, todas las magnitudes de Zn cuantificadas (Tabla 3) se encuentran por debajo del valor máximo estipulado para suelos de tipo agrícola (450 Zn mg/kg de suelo seco).

Lo anterior sugiere que, en términos de contaminación por Zn, las áreas estudiadas no superan los límites establecidos para la protección del medio ambiente y la salud humana según las normativas vigentes. Sin embargo, es necesario realizar un monitoreo continuo y un seguimiento de la calidad del suelo en estas zonas para garantizar su preservación a largo plazo y detectar cualquier cambio que pueda surgir con el tiempo.

Por otro lado, en el caso de las magnitudes cuantificadas de Pb, estas varían entre 4,4 ($\pm 0,1$) mg/kg de suelo seco (Cafetal 3) y 8,8 ($\pm 0,1$) mg/kg de suelo seco (Cafetal 1). Ninguna de las muestras analizadas provenientes de la zona protegida El Chayote presentaba Pb. Según el reglamento mencionado, ninguna muestra proveniente del cafetal se encuentra sobre el valor máximo establecido, pero esto no significa que no represente un problema.

En relación con lo anterior, aunque ninguna de las muestras del cafetal analizadas supera el valor máximo establecido por el reglamento, es importante señalar que la presencia de Pb, incluso por debajo de los límites permitidos, no debe subestimarse. El Pb es un metal pesado con efectos tóxicos graves para la salud humana y el medio ambiente, y su acumulación en el suelo puede representar un riesgo a largo plazo (Chele y Shigla, 2023). Por lo tanto, es fundamental seguir monitoreando de cerca la presencia de Pb en estas áreas y considerar acciones preventivas para mitigar cualquier posible impacto negativo en la salud pública y el ecosistema circundante.

Las magnitudes de Zn fueron considerablemente mayores a las concentraciones cuantificadas de Pb, como se mencionó antes, pero el efecto del Zn en el suelo es diferente al presentado por el Pb. Montalvo et al. (2016) indican que el Zn es un micronutriente esencial para plantas y humanos. A pesar de esto, existen extensas áreas de tierras agrícolas con deficiencia de Zn. Se estima que aproximadamente un tercio de la población mundial sufre carencia de Zn; pueden ser causas de la gran magnitud de Zn presentada por las muestras de la zona de cultivo de café o cafetal comparadas con las muestras de la zona protegida (Restrepo et al., 2016).

Al cultivarse café, se usan fertilizantes para aumentar la producción, lo cual se puede relacionar con lo expresado por Zhang et al. (2013): se puede utilizar el Zn en fertilizantes para que el cultivo absorba este micronutriente y sea consumido posteriormente por el ser humano. Sin embargo, se conoce que en

las muestras procedentes de la zona protegida El Chayote no se utilizaron fertilizantes, por lo que el Zn cuantificado en estas muestras es de origen natural. Noulas et al. (2018) mencionan que, en suelos sin contaminar y sin fertilizar, el rango de concentración de Zn varía desde los 10 hasta los 300 mg/kg de suelo seco, por lo que la concentración de Zn cuantificada en las muestra de El Chayote se encuentran dentro de lo esperado según la literatura.

Se debe señalar el uso de plaguicidas, pesticidas y fungicidas, puesto que estos agroquímicos se utilizan comúnmente en el cultivo de café. En Costa Rica, los plaguicidas más utilizados son Mancozeb, Glifosato y Paraquat (Pomareda, 2022). De estos, el Mancozeb posee alrededor de 2,5% de Zn (Méndez et al., 2013), por lo que la presencia de este metal en el suelo del cafetal analizado puede provenir tanto del uso de estos plaguicidas como de los fertilizantes.

Es relevante mencionar el efecto que tiene el Zn en la salud humana. Chen et al. (2020) exponen que los cultivos de granos, como alimento principal de por vida, son generalmente ingeridos en mayor cantidad en las dietas diarias humanas y son la principal vía de exposición a metales pesados en los seres humanos, por lo que concentraciones muy altas de Zn en los suelos, y por consiguiente en los granos de café por un proceso de bioacumulación, aumentan la concentración de este elemento en el cuerpo humano, lo que no es del todo favorable. Chen et al. (2020) también exponen que el consumo no regulado de metales pesados, en este caso Zn, puede llegar a provocar daños en los tejidos óseos, alteración endocrina e inclusive cáncer.

Al analizar las magnitudes cuantificadas de Pb (Tabla 3), se aprecia cómo solo las muestras provenientes del cafetal (1, 2 y 3) presentan dicho elemento, mientras que las de la zona protegida (El Chayote) no presentan este metal pesado. Aunque los metales pesados en los suelos pueden tener un origen geogénico o antropogénico (Larios, 2014), en este caso se aprecia una diferencia entre las muestras de suelo sometidas a actividades antropogénicas (cafetal) con las muestras no afectadas por los humanos (zona protegida El Chayote). Esto indica que el Pb cuantificado en la zona de cultivo de café proviene de actividades humanas, principalmente de agroquímicos.

Duarte (2013) menciona que, en suelos agrícolas de uso intensivo, es común encontrar niveles altos de metales como el Pb, consecuencia de una posible acumulación de los metales por la aplicación de fertilizantes químicos fosfatados y de ciertos agroquímicos; sin embargo, la presencia de Pb representa un problema, ya que la bioacumulación proveniente de cultivos de granos como el café puede llegar a producir daños en los riñones, huesos, sistema cardiovascular e inclusive daños en el sistema nervioso (Okereafor et al., 2020).

Finalmente, los resultados de este estudio destacan la importancia de monitorear y comprender las concentraciones de metales pesados, como el Zn y el Pb, en diferentes entornos agrícolas y protegidos. Si bien las concentraciones de Zn se mantienen dentro de los límites establecidos por las regulaciones ambien-

tales, su presencia en niveles significativos puede plantear preocupaciones en términos de bioacumulación y posibles efectos adversos para la salud humana, especialmente en cultivos de consumo humano como el café. Por otro lado, la detección de Pb, aunque por debajo de los límites establecidos, resalta la influencia de actividades humanas, como el uso de agroquímicos, en la contaminación del suelo y los posibles riesgos asociados para la salud y el medio ambiente.

Además, estos hallazgos subrayan la necesidad de adoptar prácticas agrícolas más sostenibles y la implementación de medidas de gestión de suelos que reduzcan la contaminación por metales pesados en las zonas de cultivo, especialmente en áreas sensibles como las zonas protegidas. El desarrollo y la promoción de técnicas de cultivo orgánico y el uso responsable de agroquímicos podrían ayudar a mitigar los riesgos asociados con la presencia de metales pesados en el suelo. Asimismo, se requiere una mayor conciencia pública sobre los efectos potenciales de la contaminación por metales pesados y una mayor regulación de su uso en la agricultura, para proteger tanto la salud humana como el medio ambiente a largo plazo.

Conclusiones

Las concentraciones de Pb y Zn cuantificadas mediante espectroscopia de absorción atómica en los dos tipos de suelos analizados (zona protegida y zona agrícola) se encontraron por debajo de los valores máximos establecidos por el Reglamento N.º 37757-S para suelos agrícolas. No obstante, los resultados evidencian diferencias claras en la presencia y magnitud de estos metales entre ambos tipos de suelo, lo cual resulta coherente con el uso y manejo del territorio.

En el caso del Zn, todas las muestras presentaron este elemento; sin embargo, las concentraciones fueron mayores en los suelos de cultivo en comparación con la zona protegida, lo cual puede atribuirse a las prácticas agrícolas, especialmente al uso de fertilizantes y agroquímicos. En contraste, las concentraciones de Zn registradas en la Zona Protectora El Chayote se encuentran dentro de los rangos naturales de suelos no fertilizados, lo que sugiere un origen predominantemente geogénico.

Por su parte, el Pb se detectó únicamente en las muestras del suelo de uso agrícola y estuvo ausente en las muestras provenientes de la zona protegida, lo que indica una influencia directa de las actividades agrícolas, particularmente del uso de fertilizantes fosfatados y otros agroquímicos. Aunque las concentraciones de Pb no superan los límites normativos, su presencia, incluso a bajos niveles, puede representar un riesgo potencial a largo plazo debido a su alta toxicidad y capacidad de bioacumulación.

Finalmente, los resultados confirman que el tipo de uso del suelo influye de manera determinante en la presencia y concentración de metales pesados, lo cual evidencia una relación directa entre las actividades agrícolas y el incremento de Zn y Pb en este tipo de suelos. Estos hallazgos resaltan la importancia del

monitoreo periódico de metales pesados en suelos agrícolas, así como la necesidad de promover prácticas agrícolas más sostenibles y un uso responsable de los agroquímicos, para minimizar la acumulación de contaminantes, proteger la calidad del suelo y reducir los riesgos de transferencia de metales pesados a la cadena alimentaria y a la salud humana.

Referencias

- Andrade, K., Castillo, I., y Quispe, R. (2020). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas y suelos para cultivo de solanum tuberosum de la bahía interior de Puno. *Rev. Investigación & Desarrollo*, 20(1), 147-153. DOI: 10.23881/idupbo.020.1-11i
- Amezcu, J. y Lara, M. (2017). El zinc en las plantas. *Rev. Ciencia*, 68(3), 30-32. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-68-numero-3/421-el-zinc-en-las-plantas6+6666666>
- Arévalo, G., Obando, C., Zúñiga, C., Arévalo, H., Baligar, V. y Zhenli, H. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (Theobroma cacao L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Benítez, M. (2017). *Evaluación de la concentración de plaguicidas y metales pesados en las aguas del embalse El Guájaro, atlántico* [Tesis de licenciatura, Universidad de la Costa]. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/249>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cebrián-Piqueras, M. A., Filyushkina, A., Johnson, D. N., López-Rodríguez, M. D., March, H., Oteros-Rozas, E., Peppler-Lisbach, C., Quintas-Soriano, C., Raymond, C. M., Ruiz-Mallén, I., van Riper, C. J., Zinngrebe, Y. y Plieninger, T. (2020). Scientific and local ecological knowledge, shaping perceptions towards protected areas and related ecosystem services. *Landscape Ecol*, 35, 2549-2567. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01107-4>
- Chele, N. y Shigla, J. (2023). *Recuperación de plomo y zinc de suelos contaminados por acción minera utilizando fitorremediación con Jatropha Curcas y adsorción con clinoptilolita* [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. <https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d92dc18f-d747-423a-8867-5224a8c77b5a/content>
- Chen, X., Liu, Y., Zhao, Q., Cao, W., Chen, X. y Zou, C. (2020). Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application. *Environmental Pollution*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114348>
- Duarte, V. (2013). *Origen y distribución espacial de metales pesados en suelos de Zimapán, Hidalgo* [Tesis de postgrado, Colegio de Postgraduados Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas].
- García, H., El Zauahre, M., Morán, H., Acosta, Y., Senior, A. y Fernández, N. (2006). Análisis comparativo de dos técnicas de digestión para la determinación de metales pesados en lodos residuales. *Multiciencias*, 6(3).

<https://biblat.unam.mx/hevila/Multiciencias/2006/vol6/no3/4.pdf>

- Hernández, L., Viveros, G., Martínez, N., Rocha, D. y Contreras, R. (2014). Análisis de suelo y foliar en guanábano (*Annonamuricata* L.) en blanca espuma municipio de Alto Lucero, Veracruz. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36, 157-165. <https://www.scielo.br/j/rbf/a/53Cmvr6WjLCgmqYJTVYYK4b/?format=pdf&lang=es>
- Jolly, Y. N., Islam, A. y Akbar, S. (2013) Transfer of metals from soil to vegetables and possible health risk assessment. *SpringerPlus*, 2(385). <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-385>
- Landini, F., Beramendi, M., Vargas, G. (2019). Uso y manejo de agroquímicos en agricultores familiares y trabajadores rurales de cinco provincias argentinas. *Revista Argentina de Salud Pública*, 10(38), 22-28. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853810X2019000100022&script=sci_arttext&tlng=en
- Larios, M. (2014). *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de Ribera de la cuenca del Río Turia* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Lleida]. <http://hdl.handle.net/10261/141280>
- Ley de Biodiversidad [Ley 7788]. Art. 58. 27 de mayo de 1998 (Costa Rica). https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=39796#ddown
- Lizcano, R., Olivera, D., Saavedra, D., Machado, L., Rolando, E., Moreno, M. y Fidel, M. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*. Centro de Formación Agroindustrial La Angostura Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/7793>
- Medina, G. (2017). *3262UY, Digestión de matrices sólidas (suelos, sedimentos) para determinar los metales capaces de extraerse en las condiciones del ensayo*. Ministerio de Ambiente de Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/digestion-suelos-sedimentos-para-determinacion-metales-sistema-cerrado>
- Meléndez, J. y García, M. (2011). *Rehabilitación de un suelo con bajo perfil de nutrientes aplicando biosólidos como fertilizantes* [Tesis de fin de grado, Instituto Politécnico Nacional]. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/jspui/handle/123456789/12811>
- Méndez, C., Bertsch, F. y Castro, O. (2013). Efecto de la aplicación de los fungicidas propineb y mancozeb sobre el estado nutricional de plántulas de banano en medio hidropónico. *Rev. Agron. Costarricense*, 37(1). [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242013000100001#:~:text=Los%20fungicidas%20utilizados%20se%20caracterizan,de%20Zn%20\(Lo%20et%20ál](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242013000100001#:~:text=Los%20fungicidas%20utilizados%20se%20caracterizan,de%20Zn%20(Lo%20et%20ál)
- Mendoza, B., Torres, D., Merú, L., Gómez, C., Estanga, B. y García, Y. (2021). Concentración de metales pe-

- sados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoL*, 24 (51). p. e1738. <https://doi.org/10.22430/22565337.1738>
- Mohd, F., Vimala, B., Rathi, D. N. y Mohd, N. (2019). Atomic absorption spectroscopy for food quality evaluation. *Evaluation Technologies for Food Quality*. 145-173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00009-3>
- Montalvo, D., Degryse, F., da Silva, R., Baird, R. y McLaughlin, M. (2016). Chapter Five - Agronomic Effectiveness of Zinc Sources as Micronutrient Fertilizer. *Advances in agronomy*, 139, 215-267. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.004>
- Moya, I. y Quezada, S. (2022). *Determinación De Presencia De Metales Pesados En Las Hojas De Kalanchoe Pinnata (Hoja Del Aire) Por Espectrofotometría De Absorción Atómica* [Trabajo de grado, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/65572/1/BCIEQ-T-%200830%20Moya%20Miranda%20Isabel%20Carolina%3b%20Quezada%20Aristega%20Stephani%20Gabriela.PDF>
- Noulas, C., Tziouvalekas, M. y Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>
- Okereafor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okereafor, N., Sebola, T. y Mavumengwana, V. (2020). Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic life and Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(7), 1-24. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>
- Osorio, N. (2012). Toma de muestras de suelos para evaluar la fertilidad del suelo. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(1), 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/Toma-de-muestras-de-suelos-evaluacion-de-fertilidad-del-suelo-Walter-Osorio.pdf>
- Pomareda, F. (2022). PNUD: Costa Rica usa hasta 8 veces más plaguicidas que los demás países OCDE de América. *Semanario Universidad*. [https://semanariouniversidad.com/pais/pnud-costa-rica-usa-hasta-8-veces-mas-plaguicidas-que-los-demas-paises-ocde-de-america/#:~:text=El%20Mancozeb%20es%20el%20plaguicida,701.239\)%2C%20según%20el%20estudio.](https://semanariouniversidad.com/pais/pnud-costa-rica-usa-hasta-8-veces-mas-plaguicidas-que-los-demas-paises-ocde-de-america/#:~:text=El%20Mancozeb%20es%20el%20plaguicida,701.239)%2C%20según%20el%20estudio.)
- Restrepo, C., Coronell, M., Arollo, J., Martinez, G., Sánchez, L. y Sarmiento, L. (2016). La deficiencia de zinc: un problema global que afecta la salud y el desarrollo cognitivo. *ARCHIVOS LATINOAMERICANOS DE NUTRICIÓN*, 66 (3), 165-175. <https://ve.scielo.org/pdf/alan/v66n3/art02.pdf>
- SINAC. (2019). *Plan general de manejo de la Zona Protectora El Chayote y Río Toro*. Sistema Nacional de Áreas de Conservación. <https://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan%20Manejo%20ACC/Zona%20Protectora%20El%20Chayote%20y%20Zona%20Protectora%20R%C3%ADo%20Toro.pdf>

- ThermoScientific. (2018). *Iron, copper and zinc determination in wine using Flame Atomic Absorption Spectroscopy*. Nota de Aplicación 43189. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Application-Notes/AN-43189-AAS-Iron-Copper-Zinc-Wine-AN43189-EN.pdf>
- Vallejo, Q. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia forestal*, 16(1), 83-99. <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a06.pdf>
- Vargas, P. (2021). *Efecto de tres extractos húmicos en la remoción del zinc, cobre, plomo y cadmio en suelos franco-arenosos contaminados, Huaraz-2016* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo]. https://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4902/T033_19192531_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zhang, Y., Pang, L., Yan, P. et al. (2013). Zinc fertilizer placement affects zinc content in maize plant. *Plant Soil*, 372, 81-92. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1904-9>