

Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú)

Level of soil contamination with arsenic and heavy metals in Tiquillaca (Peru)

Benito Hugo Fernandez Ochoa^{1*}, Eliana Mullisaca Contreras² y Luz Elizabeth Huanchi Mamani³

Resumen

Los Andes juegan un papel importante en la provisión de los servicios ecosistémicos, sin embargo, la mayor amenaza que hoy enfrenta es la contaminación del suelo por metales pesados, los cuales constituyen un riesgo por la interacción del hombre y el medio ambiente, en este entender se hace necesario fomentar investigaciones en la región montañosa en actividades que contravengan al desarrollo sostenible de la región. El objetivo fue evaluar el nivel de contaminación de suelo por metales pesados por medio del índice de geo acumulación y predecir la influencia que ejerce el pH y materia orgánica en la distribución de los metales en el suelo. La metodología implicó la extracción de cuatro muestras de suelo obtenidas en zona colindante a la quebrada Paxa, lugar de vertimiento de los residuos mineros; se evaluó la concentración total de Arsénico, Bario, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo, Níquel y Zinc por el método espectrofotometría de emisión óptica, pH y materia orgánica por potenciometría y colorimetría respectivamente. Los resultados mostraron Índices de geo acumulación para el As, Cd y Pb con nivel en el rango de moderadamente a fuertemente contaminado (clase 1,2 y 3 respectivamente), mientras que los suelos no resultaron contaminados con Ba, Cr, Cu, Ni y Zn (clase 0), ello representa un riesgo para el ecosistema Andino, dadas las características ácidas del suelo (4.1) y mínimo contenido de materia orgánica (0.8%), que promoverán la solubilidad y movilidad de los metales pesados en el suelo.

Palabras clave: Contaminación del suelo, propiedades químicas, peligrosas.

Abstract

The Andes plays an important role in the providing of ecosystem services, however, the greatest threat it faces today is soil contamination by heavy metals, which constitutes a risk in the interaction of man and the environment, in this understanding it is necessary to promote research in the mountainous region in activities that contravene the sustainable development of the region. In this sense, the objective of this study is to evaluate the level of soil contamination by heavy metals by means of the geo-accumulation index and to predict the influence of pH and organic matter on the distribution of metals in the soil. The methodology involved the extraction of four soil samples obtained in an area adjacent to the Paxa stream, where mining waste was dumped; the total concentration of Arsenic, Barium, Cadmium, Copper, Chromium, Lead, Nickel and Zinc was evaluated by the optical emission spectrophotometry method, pH and organic matter by potentiometry and colorimetry, respectively. The results showed geo-accumulation indices for As, Cd, and Pb with moderately to heavily contaminated (class 1, 2 and 3, respectively). In contrast, soils were not contaminated with Ba, Cr, Cu, Ni and Zn (class 0), which represents a risk for the Andean ecosystem, given the acidic characteristics of the soil (4.08) and minimum organic matter content (0.9%), which will promote the solubility and mobility of heavy metals in the ground.

Keywords: Soil contamination, chemical properties, hazardous substances.

Recibido: 28/02/2022

Aceptado: 29/04/2022

Publicado: 16/05/2022

Sección: Reporte de caso

***Autor correspondiente:** bhfernandez@unap.edu.pe

Introducción

El desarrollo sostenible de los Andes, implica un estudio circunstanciado de la cadena de montañas, a fin de determinar la conminación a la que están expuestas, en especial por la globalización que pone en riesgo la interacción del hombre con el medio ambiente (Escobar-Mamani et al., 2020).

El suelo es un recurso natural de gran importancia, dado los beneficios, que como servicios ecosistémicos ofrece al hombre (Burbano, 2016), dentro de los que destaca la conservación de los ecosistemas; la disponibilidad

de agua y la mitigación del cambio climático (Bedoya-Gómez et al., 2021). Servicios que vienen siendo afectados

¹Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica, Universidad Nacional del Altiplano Puno Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-435X>

²Facultad de Ciencias de Ingenierías, Universidad Nacional de Juliaca, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0555-2459>

³Facultad de Ciencias de Ingenierías, Universidad Nacional de Juliaca, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4627-6195>

Como citar: Fernandez Ochoa, B. H., Mullisaca Contreras, E., y Huanchi Mamani, L. E. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(2), 131-138. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2022.416>



especialmente por la actividad minera (Li et al., 2014) con la inadecuada disposición de residuos, lo que a que contribuido significativamente a la acumulación de los metales pesados en el suelo (Yin et al., 2016), constituyendo una problemática ambiental, ya que los metales acumulados en la superficie tienden a reducirse lentamente mediante lixiviación y/o absorción por las plantas, contaminando las fuentes de agua subterránea y alimentos que en él se desarrollen.

La presencia de metales pesados como As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn y Hg plantean un riesgo para la calidad del suelo (Loska et al., 2004) debido a su alto potencial de toxicidad y no biodegradabilidad (Chen et al., 2015); sin embargo, el grado de afectación que este pueda ocasionar depende de la solubilidad y biodisponibilidad, procesos que determinan la distribución de los metales en el ecosistema (Ahmed et al., 2015) la biodisponibilidad es la fracción del contaminante disponible para las plantas (Huaraca-Fernández et al., 2020) y está sujeto a factores como: pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico entre otros (Bu et al., 2016; Liu et al., 2018); parámetros importantes a considerar al momento de evaluar el grado de contaminación de suelos por metales (Zeng et al., 2011).

En este sentido, tan solo conocer el contenido de metales en zonas agrícolas resulta poco relevante pues no proporciona información de la distribución y el destino de los metales, siendo necesario evaluar propiedades del suelo que permitan predecir el comportamiento de los metales (Ahmed et al., 2015) a través de metodología accesible y no muy costosas como pH y el contenido de materia orgánica, tomando como referencia lo manifestado por Zeng et al. (2011) quien aduce que el pH es el parámetro más importante que brinda información de la movilidad de los metales pesados y que la prevalencia ácida, induce a la solubilidad y movilidad de los metales; por el contrario, el alto contenido de la materia orgánica inmoviliza a los metales en el suelo (He et al., 2015; Hiller et al., 2013).

Por lo expuesto, y dada la gran importancia del suelo, como servicio ecosistémico en la región de los Andes, se hace necesario evaluar el nivel de contaminación de suelo por As y metales pesados, mediante el índice de geo acumulación (I_{geo}) propuesto por Muller (1969); método que evalúa el grado de contaminación por acción natural y/o antrópica, así mismo se evalúa la correlación entre los metales, la materia orgánica y pH a fin de predecir su distribución. Este estudio informará el nivel de contaminación actual del suelo impactado por residuos mineros y posibles impactos en aguas subterráneas.

Materiales y métodos

Ámbito de Estudio

El área de estudio se localiza al sur oeste del departamento de Puno, distrito de Tiquillaca, Centro Poblado Sunsori, comunidad de Paxa, con altitud de 3 920 m.s.n.m (Fig.1).

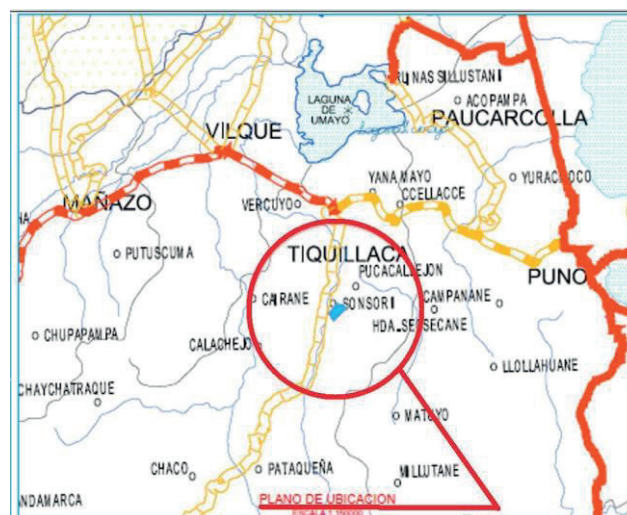


Figura 1. Ubicación centro poblado Sunsori -Tiquillaca.

El clima es frígido, seco y lluvioso, con cambios bruscos de temperatura entre el día y la noche, presentando época seca (abril-agosto), con temperaturas mínimas de 3 °C bajo cero y época lluviosa (setiembre- marzo) con temperaturas que oscilan entre 6 – 10 °C, las precipitaciones fluviales de 650 mm, humedad relativa de 49 % con vientos de 2 a 4 m s⁻¹. Los suelos son eriazos y la vegetación predominante es el *Stipa Ichu*.

Muestreo y Análisis

Se tomaron muestras de suelo superficial en época seca (mes de mayo), en cuatro zonas de suelo agrícola influenciadas por los residuos mineros, ubicadas en la comunidad Paxa con coordenadas WGS84 denominadas: M1(15° 51' 18.49"S), M2(15° 51' 19.63"S), M3(15° 51' 20.55"S) y M4(15° 51' 15.33"S) (Fig. 1). La recolección de las muestras se realizó aplicando el muestreo dirigido según la guía de muestreo de suelos (MINAM, 2014). Para efectos de representatividad, en cada sector de muestreo se recolectó submuestras a una profundidad de 30 cm; posteriormente las submuestras fueron mezcladas y reducidas hasta 500 g mediante la técnica del cuarteo (tamaño de muestra dependiente del número de ensayos a realizar). Las muestras fueron colocándolas y cerradas

herméticamente en bolsas ziploc, siendo dispuestas en enfriadores a temperaturas 4°C e inmediatamente transportadas hacia los laboratorios para realizar los ensayos correspondientes.

Los análisis de concentración total de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn fueron realizados según la norma NTP ISO/IEC 17025.2006 aplicando el método EPA 200.7; el mismo que consiste en someter a la muestra a un proceso secado (70°C) durante 48 horas. Posteriormente, las muestras fueron desecadas, trituradas y homogenizadas en mortero ágata. Para el proceso de digestión se tomaron 0.5 g de muestra, se adicionó 5 ml de mezcla $\text{HClO}_4\text{:H}_2\text{SO}_4$ en proporción de 7:1 y 15 ml de HNO_3 concentrado. La solución obtenida fue sometida a 80°C hasta evaporación total y el residuo fue tratado con 5 ml de HNO_3 concentrado, calentándose la mezcla hasta aparición de sales. Las sales obtenidas fueron acidificadas con HNO_3 0.7 M y en ella se cuantificó la concentración de metales pesados mediante el ICP-AES (espectroscopio de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado).

En cuanto al pH, fue evaluado por potenciometría, método 9045C de la EPA (2004), el mismo que consiste en preparar una suspensión (a $T^{\circ} 20 - 25^{\circ}\text{C}$) con cada una de las muestras, en una relación de 1:2, las suspensiones obtenidas son agitadas durante 15 min posterior a ello se deja reposar la mezcla en un tiempo no mayor a 2 horas. El sobrenadante es trasvasado a un vaso de precipitado de 250 ml y es allí donde se insertan los electrodos del potenciómetro previamente calibrado, procediendo con la lectura del pH. La materia orgánica fue determinada por fotometría, técnica empleada para análisis de suelos y sedimentos.

Análisis de datos

La concentración del arsénico, metales pesados, pH y materia orgánica se organizaron y procesaron con estadística descriptiva (Tabla 1), el cual permitió analizar la variabilidad y la fuente de datos, el análisis de varianza se desarrolló mediante la prueba Kruskal Wallis, estadístico no paramétrico que tiene por objetivo comparar más de dos muestras para ver si existe diferencia significativa ($\alpha=0.05\%$) entre las mismas (Beaver et al., 2010), para la presente investigación el estadístico establece la no existencia de muestras diferentes en lo que respecta al contenido de metales, pH y materia orgánica.

La relación existente entre contenido de metales, pH y materia orgánica, se determinó mediante la prueba

de correlación de Spearman (95 % de confianza). Para el procesamiento estadístico se aplicó el programa R-Studio versión 1.4.11.

Índice de geo acumulación

Para evaluar la contaminación del suelo con As, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn se hizo uso de los valores de referencia de la guía canadiense (CCME, 2007) y el nivel de contaminación, fue determinado a través del índice de geo acumulación (I_{geo}) propuesto por Muller (1969), el cual se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = Ln \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

Donde C_n es la concentración medida del elemento en el suelo, B_n es el valor del elemento en la corteza continental (Taylor & McLennan, 1995). Los valores de $I_{geo} < 0$ caracterizan al suelo como prácticamente no contaminado, $0 < I_{geo} < 1$ no contaminado a moderadamente contaminado, $1 < I_{geo} < 2$ moderadamente contaminado, $2 < I_{geo} < 3$ moderado a fuertemente contaminado, $3 < I_{geo} < 4$ fuertemente contaminado, $< I_{geo} < 5$ de fuertemente contaminado a extremadamente contaminado y $5 < I_{geo}$ extremadamente contaminado (López et al., 2017).

Resultados

La concentración de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, las características ácidas y el contenido de materia orgánica en suelo de la comunidad de Paxa, reflejan condiciones de baja calidad, atribuible a los residuos mineros dispuestos en la zona, cuya dispersión causa contaminación del suelo.

Contenido total de As y metales

El contenido medio de As y metales presentaron el siguiente patrón de distribución $\text{Cd} < \text{Ni} < \text{Cr} < \text{As} < \text{Cu} < \text{Zn} < \text{Pb} < \text{Ba}$, siendo el As, Cd y Pb, los elementos con coeficientes de variación $> 80\%$, seguido del Ni, Cr, Cu y Zn cuya variabilidad oscilan en un rango del 50-70%, en contraste con el Ba cuyo coeficiente de variación, es el menos disperso 30%. En cuanto a la distribución de metales en los cuatro sectores, el sector M4 exhibe valores máximos de As, Ba, Cd, Cu, Pb y Zn, a excepción del Cr y Ni, cuyas máximas concentraciones se reportaron en el sector M3, de la misma forma concentraciones mínimas fueron evidentes en los sectores M3 y M2 para el As, Cd, Zn, Ba y Cr, Pb, Cu y Ni (Tabla 1).

Tabla 1. Estadística descriptiva, valores máximos, mínimos y coeficiente de variación para el contenido de As y metales pesados, pH y materia orgánica.

| Metales | Unidad | M1 | M2 | M3 | M4 | Media | Mín. | Máx. | Coeficiente variación |
|---------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------------------|
| As | mg kg ⁻¹ | 2.2 | 1.8 | 1.7 | 15.8 | 5.35 | 1.7 | 15.8 | 1.3 |
| Cd | mg kg ⁻¹ | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 2.2 | 1.45 | 0.5 | 2.2 | 0.8 |
| Cr | mg kg ⁻¹ | 1.8 | 1.7 | 5.5 | 2.5 | 3.36 | 1.7 | 5.5 | 0.6 |
| Pb | mg kg ⁻¹ | 168.6 | 111.6 | 146.8 | 679.9 | 276.74 | 111.6 | 679.9 | 0.9 |
| Zn | mg kg ⁻¹ | 22.9 | 26.0 | 19.7 | 60.1 | 32.19 | 19.7 | 60.1 | 0.6 |
| Ba | mg kg ⁻¹ | 439.8 | 376.4 | 228.3 | 512.2 | 389.18 | 228.3 | 512.2 | 0.3 |
| Cu | mg kg ⁻¹ | 4.3 | 3.1 | 4.0 | 11.8 | 5.8 | 3.1 | 11.8 | 0.7 |
| Ni | mg kg ⁻¹ | 1.2 | 1.2 | 3.0 | 1.6 | 1.72 | 1.2 | 3.0 | 0.5 |
| pH | - | 5.2 | 5.3 | 5.6 | 4.1 | 5.05 | 4.1 | 5.6 | 0.1 |
| MO | % | 1.3 | 0.9 | 0.8 | 3.0 | 1.5 | 0.8 | 3.0 | 0.7 |

El As presenta concentraciones máximas en el sector M4 y mínimas en M3(Fig. 2). Los valores dispuestos por diferentes organismos es muy variable, por ejemplo Taylor & McLennan, (1995) manifiesta que el contenido natural del As en la corteza terrestre(Bn) es de 4.8 mgkg⁻¹, por el contrario, la EPA (1992) considera valores que oscilan entre 1 a 60 mg kg⁻¹ para suelos agrícolas; sin embargo, para la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2007) la máxima concentración del As en el suelo debe ser de 12 mgkg⁻¹(Tabla 2), valor que es excedido en el sector M4 de la presente investigación. En cuanto al I geo, el sector M4 presenta grado de contaminación moderado por As (clase 1), mientras que los demás sectores no presentan contaminación (clase 0).

El Cd presenta concentraciones máximas en el sector M4, cuyos valores descienden gradualmente en los sectores M1, M2 y M3(Fig. 2); sin embargo, estos resultados superan los valores naturales del elemento en la corteza terrestre Bn(Tabla 2), el contenido normal de Cd en el suelo(EPA, 1992) y los valores de referencia de metales para suelos de usos agrícola (CCME, 2007). Por consiguiente, el I geo para los sectores M1, M2 y M3 presenta contaminación moderada (clase 2) y el sector M4 estaría fuertemente contaminada (clase 3).

El Pb muestra el mismo comportamiento del As y Cd con elevadas concentraciones en el sector M4(Fig.2), pero a diferencia de estos elementos, la concentración del Pb registrada es excesivamente alta superando los 100 mg kg⁻¹; ello representaría una problemática ambiental, pues la EPA (1992), considera que el contenido normal de Pb en el suelo debería oscilar en un rango de 50-100 mg kg⁻¹ clasificando a los suelos que excedan estos valores como fitotóxicos.

En el área en estudio se reporta concentraciones en un rango de 111.6 - 679.9 mg kg⁻¹ lo cual es indicativo de un alto grado de contaminación y un peligro potencial para la flora y fauna del ecosistema. En lo que respecta a la norma Canadiense, exceden los niveles de referencia en suelos agrícolas (Tabla 2); siendo así el I geo clasifica a los

sectores M1, M2 y M3 como moderadamente contaminado (clase 2), mientras que el sector M4 estaría fuertemente contaminado (clase 3).

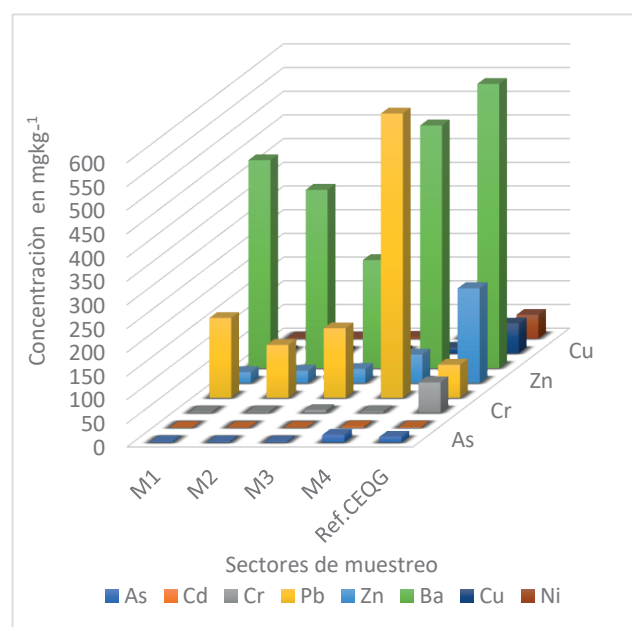


Figura 2. Concentración de As y metales pesados en los sectores M1, M2, M3 y M4.

El Ba presenta alta concentración en el sector M4 y mínimas en los sectores M1, M2 y M3 respectivamente (Fig.2); sin embargo, estos valores no superan a la normativa ambiental canadiense, ni los valores naturales de referencia (Bn) del elemento en la corteza terrestre (Tabla 2); por otro lado, la EPA, (1992) considera a este metal como tóxico, cuya biodisponibilidad estaría limitada por la concentración, la misma que es mínima en la presente investigación. Por lo tanto, el I geo clasifica a los cuatro sectores como no contaminados (clase 0) (Fig. 3).

En cuanto al Cu presenta concentraciones con el siguiente orden de distribución por sectores M4>M1>M3 >M2(Fig.2), observando máxima y mínima de 11.8 mg kg⁻¹ y 3.1 mg kg⁻¹ en los sectores M4 y M2; sin embargo, su contenido no excede a las concentraciones elementales en

la corteza terrestre Bn(Tabla 2), ni los niveles de referencia de metales para suelos de uso agrícola; en cuanto a la EPA (1992), considera como límite normal de este metal concentraciones en rango de 5 a 30 mg kg⁻¹ estando nuestros resultados dentro de lo establecido por los organismos de control. Por lo tanto, el I geo clasifica a los cuatro sectores como no contaminados (clase 0) (Fig. 3).

Con respecto al Zn se observa concentraciones con el siguiente orden de distribución M4> M2 >M1> M3(Fig.2) cuyos valores máximos y mínimos reportados son de 60.1 mg kg⁻¹ y 19.7 mg kg⁻¹, sin embargo, estos valores tampoco exceden las concentraciones elementales en la corteza terrestre Bn (Tabla 2), ni los niveles de referencia de metales para suelos de uso agrícola, además los resultados estarían dentro del rango establecido por la EPA (1992), que considera que el contenido normal del Zn en el suelo debe estar dentro del rango de 30-150 mg kg⁻¹. Por lo tanto, el I geo clasifica a los cuatro sectores como no contaminados (clase 0) (Fig. 3).

Tabla 2. Límites de referencia establecidos para metales pesados en suelos agrícolas.

| Referencia | Metales pesados en suelo agrícola mgkg ⁻¹ | | | | | | | |
|------------|--|-----|------|----|----|----|----|-----|
| | As | Ba | Cd | Cr | Pb | Cu | Ni | Zn |
| Bn* | 4.8 | 500 | 0.09 | 92 | 17 | 28 | 18 | 67 |
| CEQG | 12 | 750 | 1.4 | 64 | 70 | 63 | 50 | 200 |

Bn* Valores de referencia de metales en el suelo
CEQG *Canadian Environmental Quality Guideline*

El Cr se comportó de manera diferente a los otros elementos a excepción del Ni, cuyas altas concentraciones se reportaron en el sector M3(Fig. 2). No obstante, el contenido del elemento no supera la concentración elemental en la corteza terrestre Bn, ni los niveles de referencia de metales para suelos de uso agrícola (Tabla 2); pero se debe considerar que la concentración del Cr en el sector M3, si está dentro del rango tóxico para las plantas descrito por la Agencia de Protección Ambiental(5 y 30 mg kg⁻¹), representando un riesgo dada la alta toxicidad que presenta el elemento en estudio; pese a ello, el I geo clasifica a los cuatro sectores como no contaminados(clase 0) (Fig. 3).

El Ni es un nutriente esencial para el ser vivo y presenta el mismo comportamiento del Cr, presentando máximas concentraciones en el sector M3(Fig. 2), cuyo valor asciende a 3.0 mg kg⁻¹; sin embargo, este valor no exceden las concentraciones elementales de la corteza terrestre Bn(Tabla 2), ni los niveles de referencia de metales para suelos de uso agrícola, así también los resultados se encuentra dentro del rango normal(0.1 a 5 mg kg⁻¹) establecido por la EPA, (1992); de la misma forma los resultados no exceden los niveles de toxicidad (10 a 100 mg kg⁻¹) mencionados por este organismo. Por lo tanto, el

I geo clasifica a los cuatro sectores como no contaminados (clase 0) (Fig. 3).

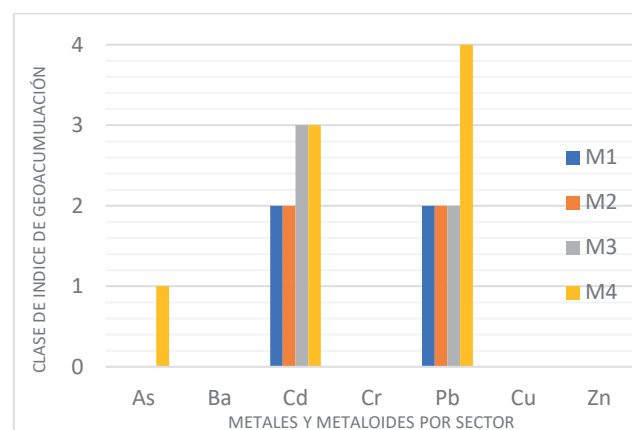


Figura 3. Clase de índice de geo acumulación del As y metales por sectores.

pH y Materia Orgánica

En la Tabla 1 se observan los valores mínimos y máximos del pH (4.1 y 5.6) caracterizando al sector M4 y M3 respectivamente como extremadamente y fuertemente ácidos (EPA,1992). Esta característica, es propia de suelos afectados por residuos mineros cuya acidez puede provocar la biodisponibilidad de los metales pesados (Watts et al., 2019). En cuanto a la materia orgánica, presenta porcentajes mínimos y máximos en los sectoresM3 y M4 (Fig. 2).

Para la EPA (1992) los suelos con materia orgánica <2% son denominados suelos áridos muy mineralizados, mientras que porcentajes en el rango de 2-4% son considerados como suelos con contenido moderado característico de suelos con vegetación dispersa, mencionado organismo recomienda porcentajes de materia orgánica mayor al 6%, considerando su importancia en la retención de los metales hacia los cuerpos de agua. Según lo detallado anteriormente, ambas propiedades son importantes porque afectan la movilidad de los metales en el suelo (Liu et al., 2016), ya que mientras el pH promueve la movilidad en medios ácidos, la materia orgánica retiene a los metales por procesos de adsorción (Zeng et al, 2011), impidiendo de esta manera su lixiviación.

Asociación entre metales pesados, pH y materia orgánica

La matriz de correlación (Tabla 3) mostró que el contenido de metales se ve fuertemente afectado por la materia orgánica y pH, mostrando una correlación altamente significativa entre la materia orgánica y el As, Ba, Cd, Cu, Pb y Zn ($r=0.8$ y 1 y $p<0.05$); contrariamente correlaciones mínimas y negativas fueron presentadas por el Cr ($r=-2$ y $p<0.05$) y Ni ($r=-3$ y $p<0.05$).

En cuanto al pH y los elementos As, Ba, Cd, Cu, Pb y Zn resultaron ser altamente negativa ($r = -0.8$ y $r = -1$), mientras que la correlación fue mínima y positiva para el Cr ($r = 0.2$) y Ni ($r = 0.3$), con respecto a ello es interesante observar que estos dos metales se verían influenciados en su comportamiento por el pH, a comparación de los otros seis elementos cuya influencia estaría determinada por el contenido de materia orgánica.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Zeng et al. (2011), quienes manifiesta que el contenido de metales en el suelo es directamente proporcional al contenido de materia orgánica (Alvim & Lourenço, 2000), es decir, a mayor contenido de materia orgánica, mayor será el contenido de metales en el suelo; contrariamente el pH ácido solubilizaría a los metales promoviendo su distribución en el suelo (Watts et al, 2019).

Tabla 3. Matriz de correlaciones de Spearman entre los metales pesados, materia orgánica y pH en suelos.

| | As | Cd | Cr | Pb | Zn | Ba | Cu | Ni | pH | MO |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| As | 1,0 | 0,8 | -0,2 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | -0,3 | -1,0 | 1,0 |
| Cd | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 0,21 | -0,8 | 0,8 |
| Cr | -0,2 | 0,4 | 1,0 | 0,4 | -0,4 | -0,2 | 0,4 | 0,9 | 0,2 | -0,2 |
| Pb | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | -0,8 | 0,8 |
| Zn | 0,8 | 0,4 | -0,4 | 0,4 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | -0,3 | -0,8 | 0,8 |
| Ba | 1,0 | 0,8 | -0,2 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | -0,3 | -1,0 | 1,0 |
| Cu | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | -0,8 | 0,8 |
| Ni | -0,3 | 0,2 | 1,0 | 0,2 | -0,3 | -0,3 | 0,2 | 1,0 | 0,3 | -0,3 |
| Ph | -1,0 | -0,8 | 0,2 | -0,8 | -0,8 | -1,0 | -0,8 | 0,3 | 1,0 | -1,0 |
| MO | 1,0 | 0,8 | -0,2 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | -0,3 | -1,0 | 1,0 |

Discusión

El resultado de la presente investigación muestra a tres elementos cuyo contenido medio superan a la normativa internacional canadiense As, Cd y Pb y su acumulación estaría relacionado con la emisión de minerales polimetálicos en la zona (Montenegro et al., 2009), de la misma forma investigaciones realizadas por Watts et al. (2019), reportaron altas concentraciones de As, Cd y Cu en suelos agrícolas ubicados alrededor de un almacén de residuos mineros.

El nivel de contaminación fue evaluado mediante el Índice de geo acumulación (I geo), método que relaciona el contenido medio de los metales en el suelo, con los valores naturales de la corteza terrestre propuestos por Taylor & McLennan(1995); los resultados sugieren contaminación del suelo en grado moderado por As en el sector M4 mientras que el Cd y Pb presenta contaminación moderada en el sector M1, M2 y M3 y contaminación fuerte en el sector M4, mientras que Ba, Cu, Cr, Ni, y Zn no presenta contaminación; siendo concordante con investigaciones realizadas por Kicińska & Wikar (2021) y Loska et al.(2004) quienes informan de procesos de contaminación del suelo

en grado moderado a fuerte por Cd y Pb, aduciendo aporte antropogénico de estos metales en el suelo en estudio.

En cuanto a la influencia de la materia orgánica y pH en la distribución de los metales en el suelo, se observó una fuerte correlación positiva entre la materia orgánica y el As, Ba, Cd, Cu, Pb y Zn y contrariamente el pH presento una correlación negativa, estos resultados concuerdan con lo reportado, en donde el mayor contenido de metales fue observado en el sector que contenía mayor porcentaje de materia orgánica, pero contrario al valor de pH del suelo (Zeng, et al. 2011); sin embargo, el Cr y Ni presentan una dependencia negativa mínima con la materia orgánica, pero positiva y mínima con el pH, ello sería indicativo que estos elementos requieren de otros parámetros para evaluar su comportamiento en el suelo.

Es importante señalar que el pH es un factor importante, que influye en la distribución de los metales en el suelo, en la que medios ácidos, promoverían la solubilidad y absorción de los contaminantes por las plantas (Huaraca-Fernández et al.2020). De la misma forma, la materia orgánica es fundamental en la superficie del suelo, por la presencia de sus componentes orgánicos naturales, poseedores de ligandos y grupos funcionales con alta afinidad por los metales del suelo (Kabata-Pendias,2000), los constituyentes antes mencionados influyen en la retención de los metales pesados en el suelo, mediante mecanismos de adsorción, complejación y quelación (Alvim & Lourenço, 2000).

Sin embargo, el presente estudio reporta suelos ácidos y con poco contenido de materia orgánica, que infiere la migración de los metales hacia el agua subterránea, así como la absorción de los metales por la flora del medio (Cui et al., 2021), provocando en ellas inhibición en los procesos fotosintéticos; por el contrario, porcentajes altos de materia orgánica y medios alcalinos propiciaría la formación de quelatos, especies estables que inmovilizan a los iones metálicos impidiendo su absorción (Amaro-Espejo et al., 2020) y/o lixiviación hacia las aguas subterráneas.

En este sentido; podríamos inferir que el bajo contenido de metales en los sectores M1, M2 y M3 sería el resultado de la deficiencia de materia orgánica y pH más alto que lo reportado en el sector M4, que probablemente estaría siendo adsorbidos por otras formas químicas presentes en el suelo. Pese a ello, las cantidades mínimas reportadas representan un riesgo latente (Zeng, et al., 2011) al poder estos ser acumulados por la flora y fauna del ecosistema.

Por consiguiente, los resultados obtenidos muestran una clara repercusión en los sistemas agrícolas albergados en las montañas de los Andes, lo cual pone en riesgo la interacción del hombre con su medio ambiente (Escobar-Mamani et al., 2020) al reportar suelos contaminados por

As, Cd y Pb en grado moderado a fuertemente. En ese entender se hace necesario realizar investigaciones que evalúen la calidad de agua subterránea en la zona en estudio para comprobar su afectación y proponer alternativas de solución y permitan el desarrollo sostenible para la región.

Conclusiones

La aplicación del índice de geo acumulación, permitió evaluar el nivel de contaminación del suelo afectado por residuos mineros, en la cual se demuestra que existe contaminación por As, Cd y Pb en grado de moderado a fuerte en la región de los Andes poniendo en riesgo la interacción del hombre con el medio ambiente, ya que las actividades dominantes de la zona es la agricultura y ganadería, actividades que podrían verse afectadas por la presencia del As, Cd y Pb consideradas altamente nocivos para el ser vivo.

En relación con los parámetros y su influencia en el contenido de metales pesados, se observa que la materia orgánica ejerce gran influencia en la retención de los metales, reportándose mayor contenido de metales en los sectores con mayor contenido de materia orgánica, pero contrarios al valor de pH, se ha de tener en cuenta también que el Cr y Ni no presentan dependencia con la materia orgánica ni con el pH siendo necesario evaluar otros parámetros que ejerzan influencia en la retención de estos metales.

Referencias

- Amaro-Espejo, I. A., Del Refugio Castañeda-Chávez, M., Murguía-González, J., Lango-Reynoso, F., Patricia Bañuelos-Hernández, K., & Galindo-Tovar, M. E. (2020). Geoaccumulation and ecological risk indexes in papaya cultivation due to the presence of trace metals. *Agronomy*, 10. <https://doi.org/doi:10.3390/agronomy10020301>.
- Ahmed, I., Helal, A. N., Gamal, R., & Nehal, O. S. (2015). Influence of some organic ligands on the adsorption of lead by agricultural soil. *Arabian Journal of Chemistry*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.03.012>
- Alvim, M., & Lourenço, J. (2000). Influence of organic matter content of contaminated soils on the leaching rate of heavy metals. *Environmental Progress*, 19(1), 53-58. doi: 10.1002/ep.670190118
- Beaver, B., Beaver, R., & Mendenhall, W. (2010). Introducción a la probabilidad y estadística. In *Cengage Learning* (13a edición). <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>
- Bedoya-Gómez, B. D., Dossman-Gil, M. A., & Marín-Fernández, J. (2021). Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbría, Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 160–185. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.8>.
- Bu, J., Xu, Y., Ma, R., Wei, W., & Liu, M. (2016). Heavy metals in surface soils in the upper reaches of the Heihe River, northeastern Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. doi: 10.3390/ijerph13030247
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME (2007). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*. https://www.esdat.net/environmentalstandards/Canada/soil/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf
- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, 143–153. <https://doi.org/doi:10.3390/agronomy10020301>
- Cui, X., Geng, Y., Sun, R., Xie, M., Feng, X., Li, X., & Cui, Z. (2021). Distribution, speciation and ecological risk assessment of heavy metals in Jinan Iron & Steel Group soils from China. *Journal of Cleaner Production*, 295:126-50, 9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126504>
- Environmental Protection Agency, EPA (1992). Guide to Site and Soil Description for Hazardous Waste Site Characterization *Volume 1: Metals* by. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/200097F6.pdf>
- Environmental Protection Agency, EPA. (2004). *Method 9045D*. <http://eprints.uanl.mx/5481/1/1020149995.PDF>
- Escobar-Mamani, F., Branca, D., & Haller, A. (2020). Vista de investigación de montaña sobre y para la región andina _ Revista de Investigaciones Altoandinas.pdf. *Journal of High Andean Research*, 22(4), 311–312. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.191>
- He, S., He, Z., Yang, X., Stoffella, P. J., & Baligar, V. C. (2015). Soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils. *Advances in Agronomy*, 134, 135–225. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.005>

- Hiller, E., Petrák, M., Tóth, R., Lalinská-Voleková, B., Jurkovič, E., Kučerová, G., Radková, A., Šottník, P., & Vozár, J. (2013). Geochemical and mineralogical characterization of a neutral, low-sulfide/high-carbonate tailings impoundment, Markušovce, eastern Slovakia. *Environ Sci and Pollut Res*, 20:7627-76. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1581-5>
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Organic amendments in the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: A review. *Informacion Tecnologica*, 31:139-152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Kabata Pendias, A., & Pendias, H. (2000). Trace elements in soils and plant. In *Boca Raton* (Third Edit).
- Kicińska, A., & Wikar, J. (2021). Ecological risk associated with agricultural production in soils contaminated by the activities of the metal ore mining and processing industry - example from southern Poland. *Soil and Tillage Research*, 205(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104817>.
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 468–469, 843–853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>.
- Liu, J. W. (2016). Thallium transformation and partitioning during Pb-Zn smelting and environmental implications. *Environ*, 77-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.046>
- Liu, T., Li, F., Jin, Z., & Yang, Y. (2018). Acidic leaching of potentially toxic metals cadmium, cobalt, chromium, copper, nickel, lead, and zinc from two Zn smelting slag materials incubated in an acidic soil. *Environmental Pollution*, 238. 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.022>
- López, M., Del Rincón, M., Muñoz, C., Ruiz, G., Solís, S., & Zanor, G. A. (2017). Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 27:10-21. doi: 10.15174/ au.2017.138
- Loska, K., Wiechulla, D., & Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30(2), 159–165. doi:10.1016/S0160-4120(03)00157-0
- Ministerio del Ambiente, MINAM (2014). Guía para el muestreo de suelos. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>
- Montenegro, G., Fredes, C., Mejías, E., Bonomelli, C., & Olivares, L. (2009). Contenidos de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero chileno. *Agrociencia*, 43(4), 427–435. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n4/v43n4a9.pdf>
- Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2(108-118)
- Taylor, S., & McLennan, S. (1995). The geochemical the continental evolution crust. In *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Watts, B. K. (2019). mine tailings in an African tropical environment— mechanisms for the bioavailability of heavy metals in soils. *Environ Geochem Health*, 1-26. doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00326-2>
- Yin, H., Tan, N., Liu, C., Wang, J., Liang, X., Qu, M., Feng, X., Qiu, G., Tan, W., & Liu, F. (2016). The associations of heavy metals with crystalline iron oxides in the polluted soils around the mining áreas in Guangdong Province, China. *Chemosphere*, 161, 181–189. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.018>
- Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., Ouyang, Y., Qiu, B., Wu, F., & Zhang, G. (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution*, 159(1), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.01>