

Impact of mining tailings seepage on agricultural soils: Comparative analysis of Cu and Pb in Quiruvilca, Perú

Cesar Antonio Pardo-Yacupayco,¹ , Neker Esmit Vega-Villalobos,¹ , Shafurs Eleazar Garcia-Giraldo,¹ , Walter Klysman Laiza-Vera, Ing.¹ , Manuel Alejandro Minaya-Masias, Msc.¹ , Jorge Ysaac Zavaleta-Linares, Msc.¹ , N00325349@upn.pe, N00168717@upn.pe, N00346942@upn.pe, walter.laiza@upn.pe, manuel.minaya@upn.edu.pe, jorge.zavaleta@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Abstract — *The contamination of agricultural soils by heavy metals from mining activities constitutes a significant threat to environmental sustainability and human health. The objective of this research was to conduct a comparative analysis of the presence of copper (Cu) and lead (Pb) in agricultural soils affected by tailings seepage in the Quiruvilca area, Peru. The study adopted a quantitative approach with a non-experimental design, considering six soil samples and six tailings water samples collected at different points within the study area. The samples were analyzed using volumetric techniques and atomic absorption spectroscopy. The results showed high concentrations of Cu in soils, reaching values of up to 0.03%, exceeding the Environmental Quality Standards (ECA). In the case of tailings water, Cu concentrations reached up to 72.25 ppm and Pb ranged between 1.21 and 1.73 ppm, exceeding the limits established by the National Water Authority (ANA). It is concluded that tailings seepage has generated a significant chemical alteration in the agricultural soils of the study area, with elevated concentrations of Cu and Pb, representing an environmental and productive risk for agricultural activity.*

Keywords- Mining tailings, agricultural soils, Quiruvilca mining, tailings seepage and agricultural irrigation.

Impacto de filtraciones de relaves mineros en suelos agrícolas: Análisis comparativo de Cu y Pb en Quiruvilca, Perú

Cesar Antonio Pardo-Yacupayco,¹ Neker Esmat Vega-Villalobos,¹ Shafurs Eleazar Garcia-Giraldo,¹ Walter Klysman Laiza-Vera, Ing.¹, Manuel Alejandro Minaya-Masias, Msc.¹, Jorge Ysaac Zavaleta-Linares, Msc.¹,
N00325349@upn.pe, N00168717@upn.pe, N00346942@upn.pe, walter.laiza@upn.pe, manuel.minaya@upn.edu.pe,
jorge.zavaleta@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Resumen – La contaminación de suelos agrícolas por metales pesados provenientes de actividades mineras constituye una amenaza significativa para la sostenibilidad ambiental y la salud humana. El objetivo de esta investigación fue realizar un análisis comparativo de la presencia de cobre (Cu) y plomo (Pb) en suelos agrícolas afectados por filtraciones de relaves mineros en la zona de Quiruvilca, Perú. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, considerando seis muestras de suelo y seis muestras de agua de relaves recolectadas en distintos puntos de la zona de estudio. Las muestras fueron analizadas mediante técnicas de volumetría y espectroscopía de absorción atómica. Los resultados evidenciaron concentraciones elevadas de Cu en suelos, alcanzando valores de hasta 0.03 %, superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). En el caso del agua de relaves, se registraron concentraciones de Cu de hasta 72.25 ppm y Pb entre 1.21 y 1.73 ppm, excediendo los límites establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Se concluye que las filtraciones de relaves mineros han generado una alteración química significativa en los suelos agrícolas de la zona de estudio, evidenciando concentraciones elevadas de Cu y Pb, lo que representa un riesgo ambiental y productivo para la actividad agrícola.

Palabras Clave- Relaves mineros, suelos agrícolas, minería Quiruvilca, filtraciones de relaves y riego agrícola.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos agrícolas por metales pesados constituye una problemática ambiental crítica que afecta la sostenibilidad de los sistemas productivos, especialmente en regiones donde el riego depende de fuentes de agua potencialmente contaminadas. Esta situación compromete no solo la calidad de los cultivos, sino también la salud humana debido a la posible incorporación de estos elementos en la cadena alimentaria [1].

En este contexto, resulta fundamental comprender la dinámica de los metales pesados en el suelo, ya que su origen, distribución y movilidad están estrechamente relacionados con propiedades edáficas como el pH y el contenido de materia orgánica, factores que influyen directamente en su disponibilidad y absorción por parte de

las plantas, particularmente en el caso del plomo (Pb) y el cobre (Cu) [2]. Asimismo, en el marco del monitoreo ambiental, la problemática se extiende a otros ecosistemas como los sistemas fluviales. En una investigación de evaluación de variables fisicoquímicas y concentraciones de metales pesados en muestras de agua de mar, este estudio es un ejemplo de cómo la contaminación se extiende a través de los cuerpos de agua, lo que justifica la atención a la calidad del agua en todas las matrices ambientales.[3]

Como principal fuente de contaminación en el ámbito agrícola, la actividad minera representa un riesgo de ingreso de metales pesados a los sistemas agropecuarios. Por ejemplo, en un estudio por contaminación de metales pesados en sedimentos del agua de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray en el Perú. En esta investigación, los autores encontraron que las concentraciones de metales como Zinc (Zn), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Arsénico (As) superaron los límites permisibles en los sedimentos, señalando a la minería ilegal y los centros poblados como las principales fuentes.[5]. De manera similar, al evaluar los efectos adversos de metales pesados, incluyendo Pb y Cu, en plantas de maíz regadas con agua de río. En esta investigación se buscó determinar el grado de absorción y acumulación de estos metales en las partes orgánicas del maíz en la cuenca baja del río Huaura. Por consiguiente, la contaminación en suelos, agua y cultivos es un tema que justifica la realización de una evaluación integral de riesgos para la salud humana. [6]. Así mismo, para el ámbito internacional en un estudio, evaluaron la contaminación por metales pesados y metaloides en matrices agrícolas de Gopalganj, Bangladesh, y encontraron que las áreas con influencia industrial (Gobra) mostraron las mayores concentraciones de contaminantes, incluyendo Cu y Pb, en suelo y vegetales, lo que subraya un riesgo para la salud.[7].

Por otro lado, en el caso específico de las filtraciones de relaves mineros, la cuantificación de metales en el tejido vegetal proporciona evidencia irrefutable de la transferencia de contaminantes. Una investigación realizada en el Perú, se enfocó en la cuantificación de Cobre (Cu), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Cadmio (Cd) absorbidos por plantas de girasol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros. En esta investigación, se encontraron valores de

Cobre (Cu) superiores a 100 mg/kg en los diferentes órganos de la planta, confirmando la bioacumulación directa desde el material residual. [8]

Asimismo, una investigación realizada en Colombia, a través de su Programa de Identificación de Sitios Contaminados (TSIP), se centró en la evaluación rápida de sitios contaminados con mercurio. En este estudio, los autores encontraron que el uso de la metodología TSIP es una herramienta esencial para la identificación y gestión de riesgos en zonas afectadas por la minería [11]. A partir de esto, es importante destacar que la contaminación es una consecuencia directa de las actividades mineras y agropecuarias.

El análisis concluye que existe una externalidad negativa unidireccional, donde la producción agrícola es la que soporta el daño de la contaminación por metales pesados, a pesar de los beneficios económicos de la minería, afectando la biodiversidad. [12]

De la misma forma, se profundiza en el impacto biológico y toxicológico; la presencia de metales pesados en suelos y agua provoca fitotoxicidad en las plantas. También genera riesgos directos a la salud humana, debido a que metales como el Pb causa desórdenes metabólicos, estrés oxidativo y afecta la eficiencia fotosintética de las plantas, representando un peligro para la salud humana [13].

Por consiguiente, la necesidad de un análisis comparativo se justifica en la amplia evidencia de riesgo. Por un lado, en el marco del monitoreo ambiental minero en Solnechny, Rusia, la investigación se centró en la evaluación del estado elemental de la población joven en zonas afectadas. Donde se encontró la formación de zonas biogeoquímicas con concentraciones elevadas de metales pesados, como resultado de la prolongada operación de la planta minera y de procesamiento, lo que subraya la necesidad de un seguimiento continuo del riesgo. [14]. Por otra parte, la contaminación minera también afecta ecosistemas acuáticos críticos, como las lagunas altoandinas peruanas. En una aproximación limnológica, se dedicaron a la evaluación de bioindicadores y contaminación donde se evidenció la contaminación por metales pesados en las muestras de agua y sedimento de los lagos y utilizaron macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores del impacto antropogénico. [15]

Sin embargo, para la gestión efectiva de esta problemática en los suelos, es imprescindible contar con un marco metodológico adecuado. En consecuencia, el establecimiento de valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas es crucial para la planeación y gestión ambiental del recurso suelo. Por el contrario, se argumenta que la falta de estos valores impide a las autoridades competentes evaluar con precisión el grado de contaminación y establecer un control efectivo. Estos valores son vitales para evitar problemas ambientales que surgen cuando la toxicidad de los metales se manifiesta al ser movilizados a la cadena trófica. [16]

De otra manera, en la Amazonía peruana, se analizó las concentraciones de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Mercurio (Hg) en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera donde se encontró que la bioacumulación de estos metales en los cultivos excedía los límites permisibles en algunos casos, lo que representa un riesgo significativo e inminente para la salud de las poblaciones locales, justificando plenamente la urgencia de investigar la contaminación por relaves.[17]

No obstante, la evaluación de la calidad del agua de riego es vital para la sostenibilidad agrícola. Las características fisicoquímicas y los niveles de metales pesados en el agua del río Metti en Etiopía se encontraron que los parámetros analizados estaban dentro de los límites aceptables para el riego agrícola, contrastando con la alta contaminación encontrada en otras zonas mineras. [18] Asimismo, la evaluación de los niveles de metales pesados en cultivos de consumo masivo, como el repollo (cabbage), es esencial para la seguridad alimentaria y las prácticas agrícolas.[19]

El objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis comparativo de Cu y Pb en Quiruvilca, Perú en suelos agrícolas afectados por filtraciones de relaves mineros. Para ello, se han definido los siguientes objetivos específicos: Identificar la presencia de metales pesados como Pb y Cu en los suelos agrícolas en diferentes distancias a los depósitos, evaluar los contaminantes presentes en el agua de los relaves mineros, por lo que es importante comparar las concentraciones de los metales pesados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los límites de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

II. METODOLOGÍA

A) *Diseño de la investigación*

El diseño de la investigación es no experimental, de tipo descriptivo-comparativo, ya que se analizan datos obtenidos de muestras reales de suelo agrícola y agua de relaves mineros sin manipulación de variables. El estudio se enfoca en comparar las concentraciones de metales pesados (Cu y Pb) en diferentes puntos de muestreo para evaluar el impacto de las filtraciones de relaves en la zona de Quiruvilca.

B) *Enfoque de la investigación*

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en el análisis de datos numéricos correspondientes a las concentraciones de metales pesados en suelo y agua. La investigación es de tipo aplicada, debido a que busca resolver un problema específico relacionado con la contaminación de suelos agrícolas en zonas influenciadas por actividades mineras en Quiruvilca.

C) *Población*

La población de este estudio se enfoca en las minas subterráneas del norte del Perú, con un énfasis especial en aquellas que presentan un historial de contaminación por relaves mineros en la minera Quiruvilca, ver figura 1. Las coordenadas están relacionadas a la zona donde se tomó las muestras para identificar los metales pesados.

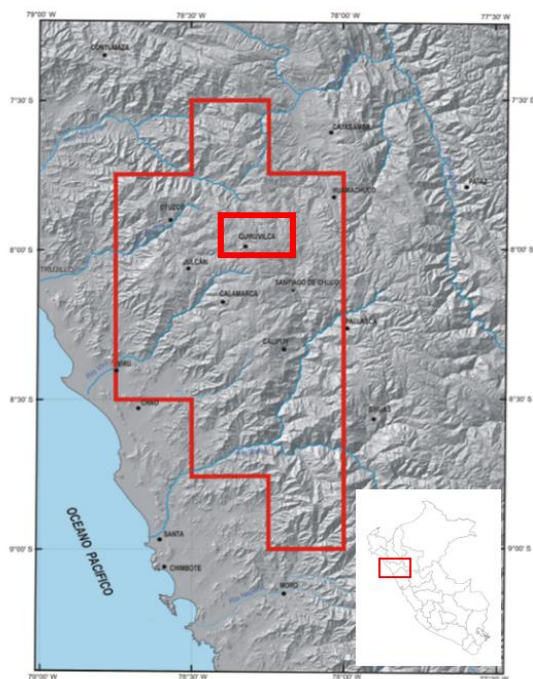


Fig. 1 Mapa de ubicación del Cuadrángulo de Quiruvilca.

D) Muestra

La muestra de este estudio está compuesta por 6 muestras de suelo agrícola y 6 muestras de agua que serán tomadas en diferentes puntos en la sierra norte del Perú - Quiruvilca. Estas muestras fueron recolectadas siguiendo un protocolo de muestreo riguroso para garantizar su representatividad. Los datos obtenidos de estas muestras, como las concentraciones de metales pesados, propiedades físicas y químicas serán cruciales para el análisis no experimental del impacto de las filtraciones de relaves mineros en el suelo agrícola.

E) Dimensión de la muestra

Este estudio está compuesto por muestras de suelo agrícola obtenidas directamente de la zona de estudio. La muestra total está conformada por los datos de diversos muestreos, distribuidos en dos grupos: datos obtenidos de muestras en terrenos agrícolas con evidencia de filtraciones de relaves y datos de estudios de terrenos cercanos con características similares, pero sin exposición a la contaminación. Los datos obtenidos garantizan la autenticidad y representatividad de la información para el análisis comparativo del impacto de las filtraciones.

F) Métodos de obtención de información

Para obtener la información, se utilizaron datos reales de las muestras tomadas en los diferentes puntos de la zona norte del Perú -Quiruvilca, también se empleó métodos de revisión sistemática de literatura científica para la verificación con los estándares de calidad ambiental (ECA) y con los límites de la autoridad nacional del agua (ANA). La información se obtuvo a partir de la recolección, análisis de artículos y revisión publicados en bases de datos científicos como: ScienceDirect, Google Académico, Scopus y Scielo.

El análisis de los datos se centrará en los resultados de laboratorio reportados, que determinan la concentración de metales pesados como Pb y Cu, así como otras propiedades físicas y químicas del suelo. Este enfoque permitirá definir los parámetros necesarios para evaluar el impacto de las filtraciones de relaves y su relación con las propiedades de los suelos agrícolas.

G) Bases teóricas

1) Análisis volumétrico

El análisis volumétrico es un método analítico cuantitativo ampliamente utilizado. Este método implica la medición del volumen de una solución de concentración conocida que se usa para determinar la concentración del analito. La cantidad de una sustancia se determina midiendo el volumen que ocupa y el volumen de una segunda sustancia que se combina con la primera en proporciones conocidas. [4]

2) Absorción atómica

La espectroscopía de absorción atómica, es un método instrumental utilizado para la determinación cuantitativa de metales presentes en una muestra. Así mismo, este método destaca por su eficiencia, rapidez y bajo consumo de reactivos, lo que lo convierte en una alternativa ventajosa frente a técnicas clásicas como la volumetría. [4]

H) Etapas Metodológicas del Estudio.

1) Recolección y Preparación de Datos

Para la primera etapa, se obtuvieron los datos de cada punto de muestreo de suelo agrícola y agua de los relaves mineros, los resultados obtenidos muestran el porcentaje de Cu y Pb. Además, los resultados corresponden a muestras recolectadas en zonas de influencia minera subterránea, lo que permitió definir los resultados de cada muestreo.

Volumetría y absorción atómica (Sólido)

$$m = C * V * f$$

Donde:

m: Masa analítica (mg)

C: Concentración asumida (mg/L)

V: Volumen final (Litros)

f: Factor de dilución

Porcentaje de la muestra:

$$P\% = \frac{m_{\text{analítico}}}{m_{\text{muestra}}} * 0.1$$

Concentración medida:

$$C = \frac{P\% * m_{\text{muestra}}}{0.1 * V * f} * 0.1$$

Fórmula para absorción atómica (Líquido)

$$A = m * c + b$$

Donde:

A = Absorbancia media

C = Concentración (ppm)

m = Pendiente

b = Intersección

Prueba en absorción atómica:

$$C = \frac{A_1 - b}{m}$$

En la tabla I se detalla los valores permisibles por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de Cu y Pb para suelo agrícola.[9]

TABLA I
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL(ECA) DE
Cu y Pb PARA SUELO AGRICOLA

Tipo de muestra	Metal	ECA (mg/Kg)
Sólido	Cu	63
Sólido	Pb	70

En la tabla II se detalla los límites permisibles por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) de Cu y Pb para riego agrícola.[10]

TABLA II
AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA) DE
Cu y Pb PARA RIEGO AGRICOLA

Tipo de muestra	Metal	ANA (mg/Litros)
Líquido	Cu	0.2
Líquido	Pb	0.05

En la tabla III se muestra los datos extraídos de laboratorio sobre el porcentaje de Cu y Pb presentes en el suelo agrícola contaminado.

TABLA III
DATOS EXTRAIDOS DE LABORATORIO SOBRE EL
PORCENTAJE DE Cu y Pb PRESENTES EN EL
SUELO AGRICOLA CONTAMINADO.

N° de muestra	Tipo de muestra	Metal	Resultado (%)
M1	Sólido	Cu	0.03
M1	Sólido	Pb	0.02
M2	Sólido	Cu	0.0265
M2	Sólido	Pb	0.02

M3	Sólido	Cu	0.0265
M3	Sólido	Pb	0.02
M4	Sólido	Cu	0.02
M4	Sólido	Pb	0.018
M5	Sólido	Cu	0.0165
M5	Sólido	Pb	0.0095
M6	Sólido	Cu	0.01
M6	Sólido	Pb	0.009

En la tabla IV se evidencia las coordenadas de cada muestra del suelo contaminado.

TABLA IV
COORDENADAS DE MUESTRAS DEL SUELO

N° de muestra	Tipo de muestra	Este	Norte
P1	Sólido	794651	9113582
P2	Sólido	794463	9113587
P3	Sólido	794118	9113537
P4	Sólido	789308	9115207
P5	Sólido	787793	9114505
P6	Sólido	786753	9113798

En la tabla V se analizó la cantidad de metales pesados presente en el agua de los relaves mineros.

TABLA V
DATOS EXTRAIDOS DE LABORATORIO SOBRE EL
PPM DE Cu y Pb PRESENTES EN EL AGUA DEL
RIO-QUIRUVILCA

N° de muestra	Tipo de muestra	Metal	Resultado (ppm)
M1	Líquido	Cu	72.25
M1	Líquido	Pb	1.73
M2	Líquido	Cu	63.02
M2	Líquido	Pb	1.69
M3	Líquido	Cu	57.05
M3	Líquido	Pb	1.57
M4	Líquido	Cu	45.07
M4	Líquido	Pb	1.48

M5	Líquido	Cu	39.98
M5	Líquido	Pb	1.33
M6	Líquido	Cu	33.75
M6	Líquido	Pb	1.21

En la tabla VI se evidencia las coordenadas de cada muestra de agua de los relaves mineros.

TABLA VI
COORDENADAS DE MUESTRAS DE LOS RELAVES MINEROS

N° de muestra	Tipo de muestra	Este	Norte
P1	Líquido	795544	9113620
P2	Líquido	794669	9113595
P3	Líquido	793821	9113495
P4	Líquido	789380	9115266
P5	Líquido	787814	9114523
P6	Líquido	786781	9113884

2) Desarrollo del estudio

El Desarrollo se llevó a cabo en un laboratorio donde se implementaron técnicas de volumetría y absorción atómica de los metales pesados. Para este estudio se emplearon muestras reales tomadas en la sierra norte del Perú, específicamente en la zona de Quiruvilca (Latitud: -7.96). Esta etapa implicó la recopilación y preparación de los datos de laboratorio para un total de 6 muestras de suelo agrícola y 6 muestras de agua de los relaves. Los datos se enfocaron en las concentraciones de Cu y Pb en el suelo, Además, en el agua de los relaves mineros.

3) Evaluación y análisis

En esta etapa, se realiza la comparación de los resultados de cada muestra recolectada en cada punto de la mina, donde se sometieron a un ensayo de laboratorio. Esta evaluación permitió identificar la presencia de metales pesados y evaluar los contaminantes en el agua de los relaves, sirviendo como base para determinar las concentraciones que la minería genera sobre la producción agrícola.

4) Evaluación y validación

El estudio se comprobó comparando los resultados de las concentraciones de metales pesados con los ECA Y ANA, obtenidos mediante muestreos. La validación de la problemática está directamente respaldada por la evidencia de la alta concentración de Cu y Pb en las muestras. Específicamente, se demuestra que los hallazgos confirman la bioacumulación y el riesgo que implican estas filtraciones para la sostenibilidad agrícola, tal como se justifica al inicio del estudio, donde se destaca la importancia de establecer valores de referencia y monitorear la transferencia de contaminantes.

III. RESULTADOS

Las gráficas generadas constituyen una herramienta visual esencial que permite realizar una comparación directa de los resultados de muestras de suelo agrícola y agua en los depósitos de relaves mineros. Esta visualización es clave para transformar datos tabulares complejos en información fácilmente interpretable para la toma de decisiones ambientales y operacionales.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las concentraciones de metales pesados. El Cu presentó un promedio de 0.0216 % en suelos y 51.85 ppm en agua, mientras que el Pb registró 0.0161 % y 1.50 ppm, respectivamente. Estos valores superan los límites establecidos por los ECA y la ANA.

El análisis de las concentraciones de Cu y Pb en las muestras M1 a M6 en los suelos agrícolas revela una tendencia general a la disminución, el Cu como elemento predominante con mayor concentración, alcanzando su máximo en M1 (0.03%), presenta la mayor diferencia con respecto a la M2. No obstante, los puntos M3 y M4 muestran una convergencia de concentraciones, donde el Pb mantiene niveles altos cercanos al Cu. Esta situación señala puntos críticos de interés con riesgo potencial equilibrado. Las concentraciones más bajas y con menor diferencia relativa se observan en M5 y M6, la presencia de ambos metales requiere una atención de gestión ambiental de las zonas más cercanas a los relaves mineros M1, M2 y M3., ver figura 2.

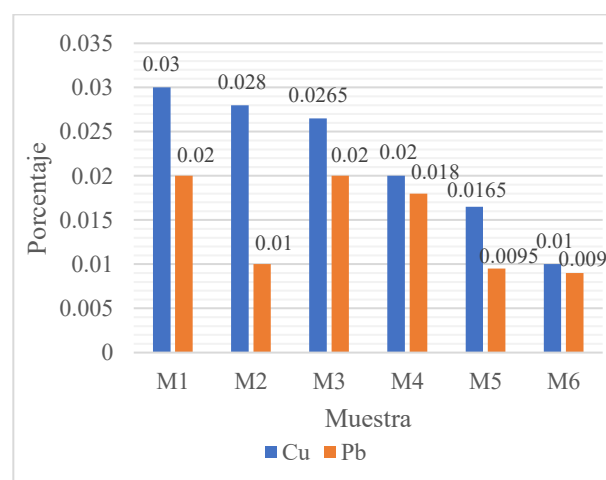


Fig. 2 Análisis de Cu y Pb en suelo agrícola contaminado.

Se evidencian los resultados del análisis del agua utilizada para el riego agrícola en zonas cercanas donde predominan los relaves mineros. Se observa que el Cu es el elemento predominante con concentraciones que varía desde 72.25 ppm y 33.75 ppm, superando ampliamente los límites establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Por otro lado, el Pb representa valores menores entre 1.21ppm y 1.73ppm, aunque también exceden el valor máximo permisible. De tal manera, estas concentraciones reflejan que el agua no se encuentra en condiciones óptimas para el riego agrícola, lo que representa un riesgo ambiental y productivo., ver figura 3.

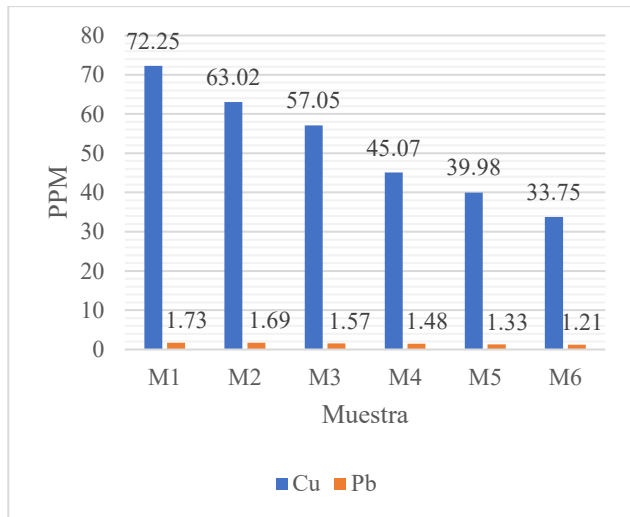


Fig. 3 Análisis de Cu y Pb de agua con los relaves mineros.

El análisis comparativo de las concentraciones de Cu y Pb en los suelos agrícolas con sus límites permitidos (ECA), en los reportes se evidencia una contaminación de los suelos agrícolas. El Cu con mayor porcentaje de contaminación de (0.03%) y su disminución en la distancia tomada en el punto M6 (0.01%). De acuerdo con las normas establecidas supera significativamente los ECA (Cu-0.0063%), ver figura 4. Además, la variación del Pb es menor a comparación de Cu donde el Pb con una concentración de (0.02% a 0.009%) en la zona estudiada. También, superan los ECA(Pb-0.007%), ver figura 5

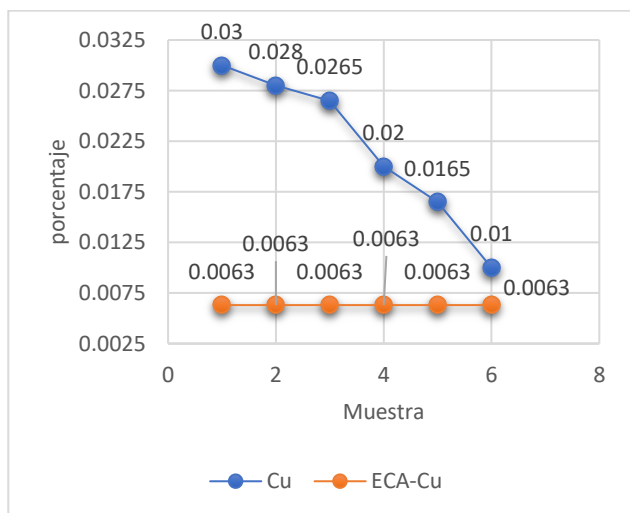


Fig. 4 Comparación de Cu y Pb en los suelos agrícolas contaminados.

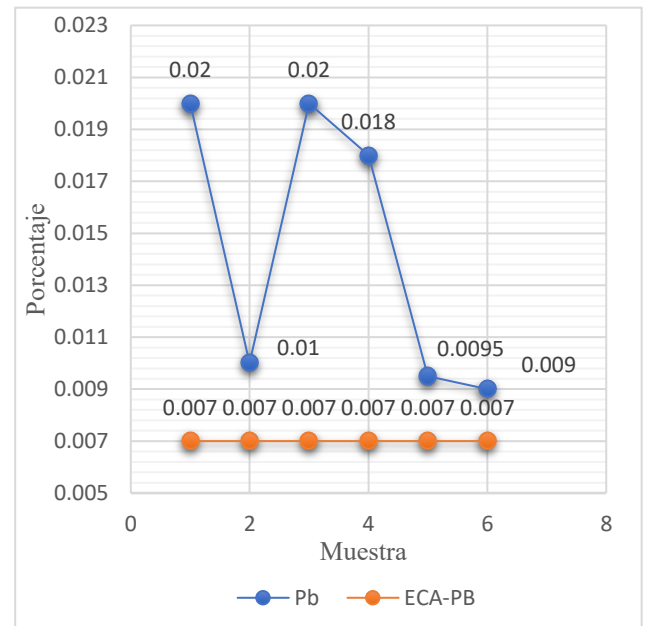


Fig. 5 Comparación de Cu y Pb en los suelos agrícolas contaminados.

Por otro lado, los resultados del análisis del agua muestran que el Cu presenta concentraciones considerablemente más altas que el Pb en el agua destinada al riego agrícola con valores que descienden progresivamente. Este comportamiento indica una tendencia de acumulación inicial elevada y una posterior disminución acelerada debido a la densidad y comportamiento del metal en el agua. Superando los límites permisibles por la ANA (Cu 0.2 mg/L) ver figura 6. De la misma manera, el Pb mantiene niveles menores lo que evidencia una disolución más estable, debido a su baja solubilidad. También, superan los valores de Pb (0.05 mg/L) establecidos (ANA), llegando a determinar la contaminación hídrica vinculada a actividades mineras., ver figura 7

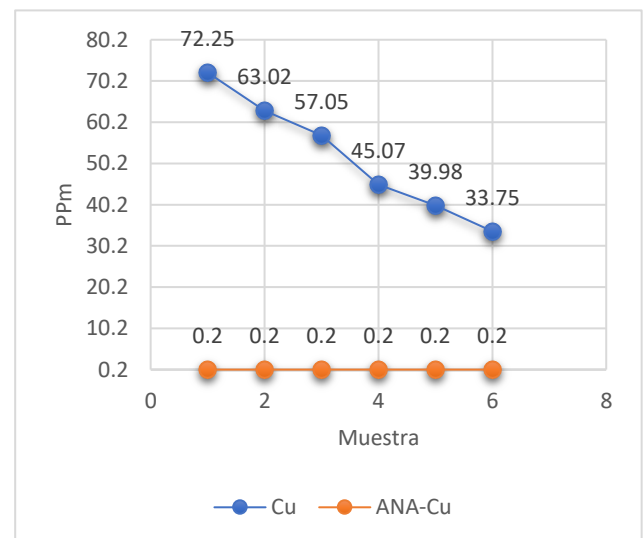


Fig. 6 Comparación de Cu y Pb de agua en los relaves mineros.

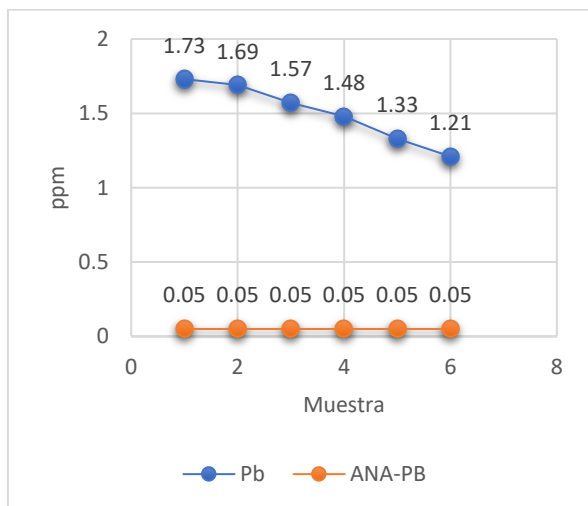


Fig. 7 Comparación de Cu y Pb de agua en los relaves mineros.

IV. CONCLUSIONES

El análisis comparativo permitió identificar concentraciones elevadas de Cu y Pb en suelos agrícolas y agua de relaves, superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los límites establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), evidenciando un impacto negativo significativo en la calidad del suelo y del recurso hídrico.

La presencia de los metales en el primer punto de muestreo con un porcentaje elevado Cu (0.03%) y Pb (0.02%) de suelos agrícolas de la zona de Quiruvilca, demuestra que los resultados reflejan una alteración química del suelo como consecuencia de las filtraciones provenientes de los relaves mineros. Mientras que, en la M6 se evidencia una baja contaminación. De igual manera, también superan los límites (ECA).

Se determinó que el agua asociada a los relaves mineros contiene una elevada concentración de Cu (72.25 ppm) y niveles de Pb (1.73 ppm a 1.21 ppm) en trazas, lo que demuestra la filtración de metales hacia las aguas empleadas para riego agrícola. Esta condición ocasiona la degradación progresiva del suelo y una disminución en la calidad de los cultivos, evidenciando el impacto directo de las actividades mineras sobre los recursos naturales utilizados en la producción agrícola.

Las concentraciones de Cu (0.03 %) y Pb (0.02 %) en suelos agrícolas, así como los valores de Cu (72.25 ppm) y Pb (1.73 ppm) en agua de relaves, superan los estándares de calidad ambiental para Cu (63 mg/kg) y Pb (70 mg/kg) establecidos por los ECA, así como los límites de Cu (0.2 mg/L) y Pb (0.05 mg/L) establecidos por la ANA, evidenciando un deterioro progresivo del suelo y del recurso hídrico que afecta la productividad agrícola

REFERENCIAS

- [1] Anaya Raymundo, MA, Rangel Morales, FM, Iannacone Oliver, JA y Romero Echevarría, LM (2022). Metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales: una revisión sistemática. IDESIA (Chile) , 40 (3), 33-41.
- [2] Anaya-Raymundo, M. A., Ruíz-Janje, A., Blas-Montenegro, L. P., Angulo-Valdivia, R. M., & De la Cruz Cámaco, D. P. (2025). Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales. Manglar, 22(2), 287-301.
- [3] Bermúdez-Kuminev, F., Herrera-Murillo, J., Lépiz-López, L., & Campos-Zumbado, A. (2025). Evaluación de variables fisicoquímicas y concentraciones de metales pesados en muestras de agua de mar de playas recreativas de Costa Rica. Revista Geográfica de América Central, 74(1), 27-53.
- [4] Campos de la Cruz, A., Vázquez González, M. Á., & Mejía Palma, V. M. (2017). Análisis comparativo de la técnica de análisis volumétrico vs absorción atómica en el laboratorio de ENSAYES de la comercializadora SAGO Import Export S.A. de C.V.
- [5] Correa Cuba, O., Fuentes Bernedo, F. E., & Coral Surco, R. G. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray - Perú. Revista de la Sociedad Química del Perú, 87(1), 26-36.
- [6] Flores Briceño, R. (2018). Efectos adversos de metales pesados en la agricultura de la cuenca baja del río Huaura-provincia Huaura 2017. Revista Ciencia y Tecnología, 14(4), 119-131.
- [7] Hossain, M. I., Aslam, M., Auwal, M. R., Masud, L. B., Subahan, M. A., Faruk, M. O., & Ali, M. S. (2025). Heavy Metal and Metalloid Contamination in Agricultural Matrices of Gopalganj, Bangladesh: A Comprehensive Analysis and Health Risk Assessment. Research Square.
- [8] Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., & Quilcat León, V. (2022). Cuantificación de Cu, Pb, As y Cd absorbidos por el "girasol" *Helianthus annuus* L. (Asteraceae) presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros. Arnaldoa, 29(1), 119-136.
- [9] Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).
- [10] Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Plataforma Digital Única del Estado Peruano.
- [11] Ortega-Ramirez, A. T., Rodríguez, A., Marín-Maldonado, D. F., Hernández, L., Espinosa, C., Binkhorst, G., & Keith, J. S. (2023). Evaluación rápida de sitios contaminados con mercurio a través del Programa de Identificación de Sitios Tóxicos (TSIP). Colombia. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (109), 48-55.
- [12] Paredes-Vilca, O. J., Jiménez Díaz, L., Dávila García, J., & Apaza Cruz, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. Revista de Investigaciones Altoandinas Journal of High Andean Research, 26(1), 56-66.
- [13] Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10(1), 29-44.

- [14] Rastanina, N. K., Golubev, D. A., Perfiliev, A. V., Rastanin, P. L., & Popadyev, I. A. (2025). Assessment of the elemental status of the young population in Solnechny, Khabarovsk krai, as part of mining environmental monitoring. *Mining Science and Technology (Russia)*, 10(2), 161-168.
- [15] Roldán Rodríguez, J., Rodríguez Castillo, A., Arriaga Verastegui, H., & Paredes Pérez, A. (2025). Bioindicadores y contaminación por metales pesados en lagunas altoandinas peruanas: Un enfoque limnológico. *Innovaciencia*, 13(1), e4951.
- [16] Rueda Saa, G., Rodríguez Victoria, J. A., & Madriñán Molina, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*, 60(3), 211-218.
- [17] Soto-Benavente, M., Rodríguez-Achata, L., Olivera, M., Arostegui Sanchez, V., Colina Nano, C., & Garate Quispe, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59.
- [18] Tadesse, H. B., Ali, N., Makuria, M. C., & Dinka, W. F. (2024). Physicochemical and Heavy Metal Analysis of River Water for Agricultural Sustainability. *Research Square*.
- [19] Tibebe, D., Bayeh, F., Kassa, Y., Mulugeta, M., Moges, Z., Yenealem, D., Fentie, T., Amare, A., Ayalew, M., Yayinie, M., & Sheferaw, H. (2024). Assessment of Heavy Metal Levels in Cabbage Samples from Northern and Central Gondar Zones: Implications for Food Safety and Agricultural Practices, Ethiopia. *Research Square*.