BIOTECNOLOGÍA
EN EL SECTOR AGROPECUARIO
Y AGROINDUSTRIAL

· ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA ·

Volumen 23, No 2 Julio-Diciembre 2025 · ISSN–1692-3561 · ISSN-e 1909-9959 · DOI: https://doi.org/10.18684

# Metales pesados en suelos y su bioacumulación en pastos irrigados con aguas contaminadas por minería en la irrigación Canal N Puno*

# Heavy metals in soils and their bioaccumulation in pastures irrigated with water contaminated by mining in Canal N irrigation Puno

CANO-OJEDA, JULIO-WILFREDO[1]

**Historial del artículo**
**Recibido para evaluación:** 23 de enero 2024
**Aprobado para publicación:** 24 de julio 2025

* Proyecto de investigación de origen: "Metales pesados en suelos y su bioacumulación en pastos de la irrigación Canal N distrito Cupi". Financiación: Universidad privada San Carlos SAC. Finalización: 2024.

1 Universidad Privada San Carlos SAC, Facultad de Ingenierías, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Mg. Educación mención Docencia y Gestión Educativa. Puno, Perú. https://orcid.org/0000-0002-7334-1100

**Correspondencia:** julio.cano@upsc.edu.pe

Cómo citar este artículo

CANO-OJEDA, JULIO-WILFREDO. Metales pesados en suelos y su bioacumulación en pastos irrigados con aguas contaminadas por minería en la irrigación Canal N Puno. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 23, n. 2, 2025, p. 30-42. Doi: INSERTAR https://doi.org/10.18684/rbsaa.v23.n2.2025.2403

## RESUMEN

*Los productores de la irrigación Canal N manifiestan que sus productos cárnicos y lácteos están perdiendo su inocuidad debido al consumo de pastos producidos en suelos contaminados por la actividad minera en la microcuenca del río Llallimayo, constituyendo un problema que compromete la seguridad alimentaria y la salud pública. Así que, para determinar la concentración de metales pesados en suelos con pastos cultivados bajo riego instalados con Medicago sativa + Dactylis glomerata, Rye gras inglés + Trifolium repens y Avena sativa; y bajo secado con pastos naturales predominantes como Aristida enodis Hack, Arístida adscencionis L. Nasella pubiflora, se tomaron 5 submuestras de suelos por parcela, considerando tres áreas por zona (Aquesaya y Curani). Finalmente, mezcladas en forma homogénea, se obtuvo una muestra compuesta de los suelos bajo riego y otra compuesta de los suelos bajo secano. Simultáneamente, resultaron 3 muestras de pastos cultivados asociados bajo riego y 1 de pastos naturales obteniendo 4 muestras compuestas para su correspondiente análisis. Los resultados de los análisis de suelos irrigados y no irrigados en mg/kg fueron Arsénico As (12,61 y 11,98), Mercurio Hg (< 0,04), Plomo Pb (23,93 y 22,61), Cadmio Cd (13,563 y 13,115), Cromo Cr (7,46 y 7,15) respectivamente. Se calcularon los factores de bioacumulación (FBA) en pastos cultivados y naturales calificando como exclusoras para (As, Pb, Cd y Cr) y como acumuladoras para Hg. Se concluye que, la concentración de Cd y Cr en suelos superan los Estándares de Calidad Ambiental DS 011 2017 MINAM y, un FBA para pastos cultivados y naturales de 7,5 para Hg, calificando como acumuladoras.*

## PALABRAS CLAVE:

Acumuladora; Agroecosistemas; Alfalfa; Análisis del suelo; Bioconcentración; Contaminación del suelo; Cultivo asociado; Cultivo de secano; Cultivos perennes; Elementos traza, Riego por gravedad; Toxicidad.

## ABSTRACT

*The producers of Canal N irrigation state that their meat and dairy products are losing their safety due to the consumption of pastures produced in soils contaminated by mining activity in the micro-basin of the Llallimayo River, constituting a problem that compromises food security and public health. So, to determine the concentration of heavy metals in soils with irrigated pastures installed with Medicago sativa + Dactylis glomerata, English Rye gras + Trifolium repens and Avena sativa; and under drying with predominant natural grasses such as Aristida enodis Hack, Aaristida adscencionis L. Nasella pubiflora, 5 soil subsamples were taken per plot, considering three areas per zone (Aquesaya and Curani). Finally, mixed homogeneously, a composite sample of irrigated soils and another composed of rainfed soils were obtained. Simultaneously, 3 samples of associated cultivated pastures under irrigation and 1 of natural pastures were obtained, obtaining 4 composite samples for their corresponding analysis. The results of the analysis of irrigated and non-irrigated soils in mg/kg were Arsenic As (12,61 and 11,98), Mercury Hg (< 0,04), Lead Pb (23,93 and 22,61), Cadmium Cd (13,563 and 13,115), Chromium Cr (7,46 and 7,15) respectively. Bioaccumulation factors (FBA) were calculated in cultivated and natural pastures, qualifying as excluders for (As, Pb, Cd and Cr) and as accumulators for Hg. It is concluded that the concentration of Cd and Cr in soils exceeds the Environmental Quality Standards DS 011 2017 MINAM and an FBA for cultivated and natural pastures of 7,5 for Hg, qualifying as accumulators.*

## KEYWORDS:

Accumulator; Agroecosystems; Alfalfa; Soil analysis; Bioconcentration; Soil pollution; Associated crop; dry farming; Perennial crops; Trace elements, Gravity irrigation; Toxicity

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por metales tóxicos constituye un importante peligro ambiental (Nedjimi, 2021; Prakash & S, 2023). En el ambiente natural, los metales pesados se encuentran conformando parte de los minerales de la roca madre del suelo, constituyendo una fuente de elementos tóxicos para la contaminación natural y antropogénica (Guzmán-Castro et al., 2022; Jeyakumar et al., 2023), debido a las múltiples actividades humanas como las emisiones industriales, residuos sólidos, efluentes, aplicación de pesticidas y fertilizantes a los cultivos incrementando los niveles de metales en los suelos (Velázquez-Chávez et al., 2022), elementos tóxicos persistentes no biodegradables que ingresan a la cadena alimentaria a través de las plantas y al ser consumidas se acumulan y biomagnifican, constituyendo un gran problema para el ambiente y la salud humana (Geetha et al., 2022; Khan et al., 2023; Nnaji et al., 2023)

La concentración de metales pesados en suelos está relacionada con el uso de aguas residuales de origen industrial para el riego de cultivos y aplicación de agroquímicos, que contienen metales pesados y fuentes geogénicas de contaminantes (Nyika & Dinka, 2022), provocando contaminación por oligoelementos vertidos por las minas al medio ambiente, convirtiéndose en una fuente de contaminación del suelo, el agua y plantas (Nassima et al., 2023), siendo los humedales altoandinos los más vulnerables a la contaminación por metales pesados (Jara-Peña, 2017).

Los suelos contaminados por metales pesados actualmente constituyen uno de los problemas ambientales más graves. Una alternativa es utilizar plantas hiperacumuladoras para extraer, desintoxicar o degradar metales nocivos utilizando tres técnicas de fitorremediación: fitoestabilización, fitoextracción y fitovolatilización para la remediación de suelos ( López & Morales, 2022; Barathi et al., 2023). Algunas plantas nativas tienen la habilidad para tolerar concentraciones altas de metales pesados (Oré Cierto et al., 2022), ofreciendo gran aptitud para la fitorremediación de suelos contaminados con As, Hg, Cd y Pb (Martínez-Manchego et al., 2021), como las especies Syringodium filiforme, Calasia testudinum y Sargassum buxifolium, identificadas como bioindicadores descontaminantes de metales pesados, demostrando sus potencialidades de bioacumulación. Con su caracterización, se establecieron comparaciones entre los tres bioindicadores, posibilitando la selección de posibles mecanismos de unión de los metales pesados a la biomasa (Leyte et al., 2019).

Badamasi et al. (2023), al realizar un análisis multivariable, revelan que las principales fuentes de contaminación por metales pesados como Cd, As, Cr y Pb proceden de actividades mineras y el Mn probablemente de materiales originales. Bedriñana et al., (2020), mencionan que la concentración de Pb en el suelo es significativamente mayor que en las raíces y parte aérea de los pastos naturales y cultivados consumidos por el ganado de las zonas altoandinas cercanas a las emisiones metalúrgicas. De modo que, los niveles de plomo en el suelo y los pastos superan los niveles tóxicos comparados con las normas nacionales e internacionales, por lo que se sugiere tomar las medidas necesarias para minimizar los efectos adversos a la salud humana al consumir alimentos producidos en ese tipo de suelos. Por su parte, Reyna y Arteaga (2022), expresan que el mercurio, arsénico, cadmio y plomo son los metales pesados más tóxicos encontrados en los alimentos que, al acumularse en el organismo por ingestión continua de pequeñas dosis, constituyen en el tiempo un riesgo para la salud, originando múltiples enfermedades, especialmente cancerígenas, debido al consumo de alimentos producidos en suelos contaminados por elementos traza (Liu et al., 2021).

El ganado vacuno que consume agua, forrajes o pastos contaminados por Hg, As, Cd y Pb, se podrían concentrar en la leche y carne, dependiendo de las condiciones del cultivo y el nivel de concentración de dichos metales en el suelo y agua (Reyna y Arteaga 2022), siendo la contaminación por Pb y Cd la más severa (Zhao et al., 2022). Por lo que es necesario identificar las fuentes (De la Cueva et al., 2021), como el mercurio (Hg) de origen volcánico y efluentes residuales procedente de la fabricación de cemento, pesticidas entre otros que, por biotransformación, el metilmercurio (Castro-González et al., 2019), se va formando en los vertimientos industriales al combinarse con carbón en los sedimentos por metilación bacteriana de mercurio inorgánico, siendo el más común especialmente en el ambiente acuático (Buritic et al., 2019). Estos tóxicos tienen gran persistencia, toxicidad y contaminación generalizada en el suelo, el agua y el aire (Singh et al., 2023), como consecuencia de las actividades mineras artesanales próximas a estos cuerpos de agua, incrementando los niveles de Hg, Cr y Al (Novoa et al., 2022), comprometiendo la seguridad alimentaria (Taghavi et al., 2023).

Es conveniente conocer la calidad de los pastos en cuanto a su nivel de inocuidad, específicamente de metales pesados, ya que, al ser consumidos por el ganado vacuno junto con el agua, forrajes y pastos contaminados por Hg, As, Cd y Pb, pueden ser transferidos a la leche, a sus derivados y carnes (Quijada Caro 2021; Reyna y Arteaga 2022). Como alimentos básicos para la población (Vega *et al*., 2022; Shahriari *et al*., 2023), pueden provocar graves problemas de salud (Yadav & Sharma, 2023), a los que se suman las actividades agropecuarias con tendencia a mejorar la producción animal, así como el procesamiento de lácteos (Cartagena, 2020). La provincia de Melgar, en la que se encuentra la irrigación Canal N, es proveedora de carnes y productos lácteos a nivel del surperuano y Lima capital. Por lo expuesto, se propuso determinar la concentración de metales pesados en suelos instalados con pastos cultivados bajo riego y en suelos con pasturas naturales bajo secano y la concentración de metales pesados en el follaje de pastos cultivados bajo riego y pastos naturales bajo secano.

## MÉTODO

### Zona de estudio

La irrigación Canal N se ubica en la microcuenca Llallimayo, distrito de Cupi, de la provincia de Melgar, Región Puno (Perú). Constituye el 13,4 % de área total de la subcuenca Ramis. La zona presenta una temperatura media anual de 8 °C, las precipitaciones pluviales oscilan entre una mínima de 2,7 y una máxima de 180 mm durante la época de lluvia y sequía, con una humedad relativa de 45 a 64 %, y la evaporación mínima y máxima entre los meses de junio y noviembre con valores de 97,6 y 175,4 mm. La microcuenca Llallimayo comprende los distritos de Ocuviri, Palca, Cupi, Llalli, Macari y Umachiri, siendo la actividad pecuaria el principal rubro económico, con predominio de crianza de vacunos tipo leche (Figura 1).

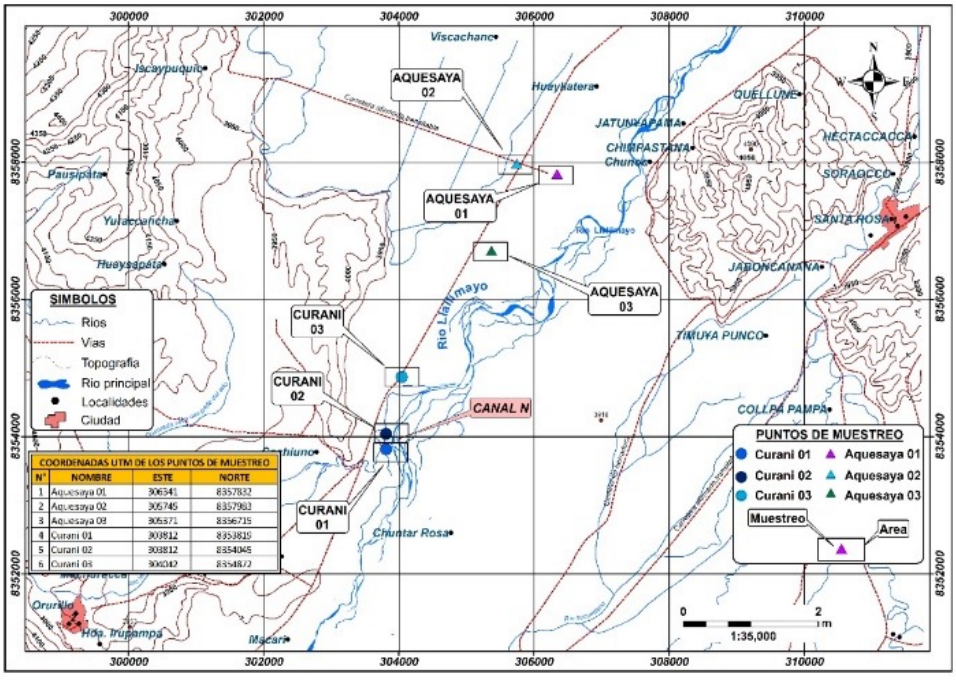



**Figura 1:** Ubicación geográfica Irrigación Canal N y puntos de muestreo

**Fuente:** Sincronización de ArcMap con Google Earth

## Muestreo de suelo y pastos cultivados y naturales

Las muestras de suelos no alteradas se recolectaron en dos zonas de la irrigación Canal N, denominadas Aquesaya y Curani (Cuadro 1). Ambas cuentan con pastos cultivados asociados bajo el sistema de riego por gravedad y con pastos naturales bajo secano con el régimen de precipitaciones. En cada zona se consideraron tres áreas representativas (áreas de muestreo de una hectárea aproximadamente), caracterizadas por contar con parcelas, con un promedio de 1500 m2, instaladas con pastos perennes asociados alfalfa + dactylis, Rye gras + trébol blanco y avena forrajera estacional y, áreas con pastos naturales. De ellas, se tomaron 5 submuestras por parcela. Finalmente, fueron mezcladas en forma homogénea para obtener una muestra compuesta de los suelos bajo riego, y otra compuesta, de los suelos bajo secano, cumpliendo con el protocolo de muestreo de suelos establecido por el ministerio del ambiente de Perú de ambas zonas (Aquesaya y Curani), debidamente identificadas en bolsas zip-lock (Cuadro 1). Simultáneamente se colectaron las submuestras de las especies forrajeras perennes asociadas bajo riego como Medicago sativa + Dactylis glomerata, Rye gras inglés + Trifolium repens, especie estacional Avena sativa, y pastos naturales predominantes como Aristida enodis Hack, Arístida adscencionis L. y Nasella pubiflora de ambas zonas seleccionadas aleatoriamente y considerando solo la parte aérea conformada por tallos, hojas e inflorescencia de cada especie, previamente deshidratadas, picadas y embolsadas. Finalmente, se obtuvo una muestra compuesta por cada grupo de especies cultivadas asociadas de las áreas bajo riego 03 muestras y 01 muestra compuesta de los pastos naturales, todas debidamente identificadas en bolsas zip-lock y enviadas a laboratorio para su análisis correspondiente, de acuerdo con la cadena de custodia coordenadas UTM y con sus respectivas claves de identificación.

**Cuadro 1.** Puntos muestreados coordenadas UTM

| Zonas | Áreas | Coordenadas UTM | |
|---|---|---|---|
| | | Este | Norte |
| Aquesaya | A 1 | 306341 | 8357832 |
| | A 2 | 305745 | 8357983 |
| | A 3 | 305371 | 8356715 |
| Curani | C 3 | 303812 | 8353819 |
| | C 2 | 303812 | 8354045 |
| | C 1 | 303842 | 8354872 |

A = Aquesaya, C = Curani

## Análisis de laboratorio

Para determinar la concentración de metales pesados en las muestras de suelos y en las especies forrajeras cultivadas bajo riego y especies naturales bajo secano, éstas fueron enviadas para su correspondiente análisis mediante el método EPA Method 200.8 Rev.5.4 1994, en el laboratorio ALAB (Analytical Laboratory E.I.R.L.) sucursal Arequipa - Perú.

Los resultados sobre la concentración de metales pesados encontrados en las muestras de suelo fueron comparados con los parámetros establecidos por la legislación peruana, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas, Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, y la concentración en el follaje de los pastos cultivados y naturales mediante el factor o índice de bioacumulación (FBA).

## Caracterización del suelo

Los suelos de la zona de estudio presentan las siguientes características: Textura franco limosa, pH de las áreas irrigadas moderadamente alcalinos, áreas no irrigadas ligeramente ácidos y materia orgánica Bajo (Cano 2021).

### Determinación del factor de bioacumulación

El factor de bioacumulación o bioconcentración (FBC) se obtuvo de la relación entre la concentración de metales pesados en la parte aérea de los pastos y la concentración de metales pesados en el suelo. El FBC se aplicó como una forma de medir la eficiencia de la acumulación de metales en la biomasa. Para su interpretación se consideraron los valores del FBC > 1 como indicador de que la especie es acumuladora, FBC > 10 que la especie es hiperacumuladora y si el FBC < 1 la especie es exclusora (Alderete-Suarez et al., 2019).

Finalmente, el Factor de Bioacumulación se obtuvo aplicando la razón de la concentración de metales pesados encontrado en los pastos, y la concentración de metales pesados en el suelo, aplicando la siguiente ecuación:

$$FBC = \frac{\text{Concentración de metales pesados en la Planta}}{\text{Concentración de metales pesados en el suelo}} \qquad \text{(Ec, 1)}$$

### Análisis estadístico

Los resultados sobre la concentración de metales pesados encontrados en las muestras de suelo se presentaron en tablas para compararlas con los parámetros establecidos por la legislación peruana, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas, Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, y la concentración en el follaje de los pastos cultivados y naturales mediante el factor o índice de bioacumulación (FBA). La interpretación correspondiente fue mediante el diseño estadístico descriptivo, analizados con el soporte de la información científica de investigaciones relacionadas al tema de investigación.

## RESULTADOS

Concentración de elementos traza en suelos bajo riego y secano.

El cuadro 2 presenta las concentraciones de Arsénico (As), Mercurio (Hg), Plomo (Pb) Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en el suelo bajo el sistema de riego por gravedad, y en el suelo bajo el régimen de precipitaciones se observa que la concentración de As, Hg y Pb no constituyen un riesgo por encontrarse por debajo de los estándares de calidad ambiental (ECA) DS 011-2017 MINAM. Sin embargo, es necesario considerar que los altos niveles de contaminación de los suelos están relacionados con el uso de aguas residuales de origen industrial y doméstico para el riego de cultivos, aplicación de agroquímicos que contienen elementos traza y fuentes geogénicas de contaminantes (Nyika & Dinka, 2022), debido a que el contenido de metales en los suelos muchas veces ocurre por geoacumulación, pudiendo llegar a niveles perjudiciales de contaminación para el ambiente (Castro-González et al., 2019). En cambio, los suelos instalados con pastos cultivados bajo riego con 13,563 y 7,46 mg/kg; así como los suelos con pastos naturales bajo el régimen de precipitaciones con 13,115 y 7,15 mg/kg de Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) respectivamente, superan en ambos casos los ECA según norma peruana DS 011-2017 MINAM.

**Cuadro 2.** Concentración de metales pesados en suelos irrigados y no irrigados según DS N° 011-2017-MINAM (ECA)

| Elementos traza | Suelos irrigados | Suelos no irrigados | ECA - DS 011 2017 MINAM | Riesgo ambiental |
|---|---|---|---|---|
| | Concentración mg/kg. | Concentración mg/kg. | | |
| As | 12,61 | 11,98 | 50 | |
| Hg | <0,04 | <0,04 | 6.6 | |
| Cd | 13,563 | 13,115 | 1.4 | ** |
| Cr | 7,46 | 7,15 | 0,4 | ** |
| Pb | 23,93 | 22,61 | 70 | |

Los resultados obtenidos tienen relación y sustento analizados por otros investigadores, como Liu et al, (2021) quien concluye que, los suelos de huerto cultivados por algunas frutas y verduras mostraron un mayor nivel de contaminación por oligoelementos en comparación con los suelos cultivados por cereales. Por su parte, Mahmmod et al., (2023), encontraron concentraciones de metales pesados en algunas áreas estudiadas superiores al límite máximo permitido, con un índice de carga contaminante promedio de (1,03), atribuyendo las altas y bajas concentraciones a las actividades humanas.

Jin et al., (2018), manifiestan que el Cd es considerado como el contaminante universal por sus altos niveles de liberación en el ambiente afectando a diferentes órganos de animales y humanos. Esto, debido a su alta toxicidad y persistencia en los suelos provocando serios problemas de carácter ambiental por su mínima pérdida microbiana y química (Geetha et al., 2022), por su gran movilidad, poder bioacumulador y a sus efectos adversos en los procesos de fotosíntesis provocando clorosis, y bajo crecimiento de las plantas, incluso a bajas concentraciones (Hernández et al., 2019), Ello, inhibe la germinación y disminución en la productividad de los cultivos (Aguirre et al., 2022).

Respecto al Cr, encontraron una relación lineal significativa entre la concentración de Cromo en suelos y en el tejido vegetal de las plantas (Lizardo y Aduvire, 2020); así como el contenido de materia orgánica se relaciona con el contenido de metales pesados, ejerciendo gran influencia en su retención con excepción del Cr (Fernandez, 2022).

La concentración de mercurio, plomo, cromo, cadmio y arsénico producen una diversidad de efectos tóxicos en diversos tejidos y órganos de los animales y seres humanos, al ingerir o entrar en contacto con ellos (Balali-Mood et al., 2021). Dichos elementos pueden ser incorporados como consecuencia de las prácticas antropogénicas inadecuadas, siendo el mayor aporte al drenaje agrícola por el transporte de partículas (Tun-Canto et al., 2017), incrementando significativamente su concentración en los suelos, debido a las actividades agropecuarias e industriales (Correa Cuba, 2021), dependiendo de las características del suelo como, materia orgánica, capacidad de intercambio de cationes y textura, favoreciendo la retención de metales pesados al reducir su biodisponibilidad (Quispe et al., 2023). Los efectos no se producen de igual manera en suelos con pH y metales diferentes (Gonzalez et al., 2022), dependiendo de la toxicidad de los metales en los vegetales, del elemento químico, de las características fisicoquímicas del suelo y de la tolerancia de cada especie vegetal (Corral Ribera, 2022).

Las actividades realizadas por la minera Aruntani SAC en el ámbito de la cuenca Llallimayo provocan a los productores de la irrigación y comunidades del entorno la protesta permanente de los moradores, manifestando que las aguas y suelos se están contaminando afectando su productividad y consecuentemente la baja calidad de sus productos (Cano, 2021), por la explotación de los yacimientos mineros de Aruntani S.A.C., filtrando óxidos y sulfuros al río, incitando continuas protestas y conflictos sociales como resultado de la contaminación de los suelos de la microcuenca.

## Factor de bioacumulación (FBA) de elementos traza en pastos cultivados y pastos naturales.

Los resultados sobre el factor de bioacumulación (FBA) de elementos traza en pastos asociados bajo riego y pastos naturales bajo secano observados en la Cuadro 3, los FBA obtenidos, producto de la concentración de metales pesados en los pastos entre la concentración de metales pesados en los suelos bajo riego y, suelos bajo el régimen de precipitaciones, obtuvieron los siguientes valores: para Arsénico (As) de 0,024 y 0,025, Cadmio (Cd) 0,022 y 0,023, Cromo (Cr) 0,134 y 0,141 para Plomo (Pb) 0,0125 y 0,0133 respectivamente. Se les calificó de acuerdo con el FBA como exclusoras para los indicados elementos, y como acumuladoras con valores de 7,5 de mercurio (Hg), las especies asociadas bajo riego, así como los pastos naturales bajo secano. Las concentraciones obtenidas se obtuvieron en la parte aérea de los pastos que consume el ganado, ya que las mayores concentraciones se encuentran acumuladas en las raíces.

**Cuadro 3.** Factor de bioacumulación (FBA) de elementos traza en pastos cultivados irrigados y naturales no irrigados

| Elementos | Concentración media en pastos cultivados asociados y naturales mg/Kg | Concentración en suelos irrigados mg/Kg | Concentración en suelos no irrigados mg/Kg | Factor de Bioconcentración | | FBA Eficiencia de acumulación |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | pastos asociados irrigados | Pastos naturales no irrigados | |
| As | < 0,30 | 12,61 | 11,98 | 0,024 | 0,025 | Exclusora |
| Hg | < 0,30 | < 0,04 | < 0,04 | 7,5 | 7,5 | Acumuladora |
| Cd | < 0,30 | 13,56 | 13,115 | 0,022 | 0,023 | Exclusora |
| Cr | < 1,00 | 7,46 | 7,15 | 0,134 | 0,141 | Exclusora |
| Pb | < 0,30 | 23,93 | 22,61 | 0,0125 | 0,0133 | Exclusora |

FBC < 1 = Exclusora, FBC > 1 = acumuladora FBC > 10 hiperacumuladora

Al respecto, Martínez et al. (2019), encontraron un factor de bioconcentración muy alto para Hg (>6), presentando una concentración moderada a considerables variaciones (>6 Cdeg <24), y un índice de carga contaminante (1,308), indicando que los suelos están contaminados por la presencia de metales pesados, lo que podría estar asociado a las actividades agrícolas y canteras realizadas cerca de los suelos agrícolas. Por su parte, Chen et al. (2024), al investigar la interacción de la rizosfera en la absorción de Cd en cultivo intercalado con dos variedades de arroz, concluyó que, un sistema de cultivos asociados puede extraer más Cd de un suelo contaminado que un sistema de monocultivo, considerando que, la eficacia de las plantas en la eliminación de metales de un suelo, está determinada por el tipo de contaminante, ya sea orgánico o inorgánico (Babu et al., 2021). Lo expresado coincide con la realidad del presente trabajo, ya que tanto los pastos irrigados como los naturales están conformados por asociaciones de especies vegetales permanentes.

Fernandez *et al*. (2022), concluyeron que los índices de geoacumulación para el As, Cd y Pb con un rango de moderado a fuerte, permitió evaluar la contaminación del suelo por residuos mineros, representando un riesgo para el ecosistema Andino. Bocardo (2021), menciona que las especies nativas, Cortaderia jubata, Baccharis sp., Stipa ichu, Juncus sp. Eragrostis nigricans, mostraron aptitudes fitoremediadoras de suelos contaminados con As, Ba, Hg, Cd y Pb; así como Cahuana (2019), al estudiar el efecto bioacumulador de metales tóxicos presentes en el suelo por las especies Stipa mucronate, Festuca dolichophylla "iru ichu" y Cortaderia sp. Concluye que la concentración de metales pesados se encuentran ausentes en el tejido vegetal de las plantas evaluadas, entre ellos el cadmio (Cd) y Mercurio (Hg); a su vez, indica que la concentración media de mercurio pocas veces excede los 400 µg/kg-1 asociado a suelos orgánicos y a los pasivos mineros situados en áreas próximas a ellos. Singh et al., (2023), contribuyen indicando que las emisiones de Hg con alta persistencia y toxicidad contaminan el suelo, el agua y el aire. La toxicidad de los metales pesados no solo depende de su concentración total, sino también de la relación entre el nivel trófico con las concentraciones de Hg, la biomagnificación, y la bioacumulación para establecer el riesgo potencial al ambiente (Salazar-Camacho et al., 2020). Todo ello requiere rehabilitar el espacio físico de la contaminación ambiental mediante estrategias ecológicas para su remediación (Khan et al., 2023).

El factor de bioconcentración y el factor de transferencia, muy utilizados para determinar la tolerancia realizada por diferentes especies, permite diferenciar plantas acumuladoras de exclusoras (Guzmán-Castro et al., 2022). Para ello, es necesario comprender los mecanismos de absorción, translocación y desintoxicación de metales pesados en plantas e identificación de las especies, (Geetha et al., 2022; Vasilachi et al., 2023), así como el grado de absorción de metales por las plantas, tipo y características del contaminante, condiciones climáticas, salinidad, propiedades del suelo y el potencial redox (Babu et al., 2021). De ahí que los metales pesados en el suelo pueden movilizarse, ser absorbidos y transportados a través de las estructuras biológicas de los vegetales, donde se biomagnifican mediante la cadena alimentaria, (Khan et al., 2023). Considerando que, las variadas respuestas morfológicas y fisiológicas de las plantas en suelos contaminados por metales pesados, se deben a que algunas son sensibles, incluso a bajas concentraciones, otras pueden desarrollar mecanismos de tolerancia y pocas especies pueden ser capaces de acumular cierta cantidad de metales pesados dentro de sus tejidos sin sufrir toxicidad (Fertilab, 2020).

Los niveles excesivos de algunos metales pueden ser tóxicos para el sistema vegetal, alterando gravemente los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Singh et al., 2023). Por su parte, Fernandez (2022), al aplicar el Índice de geoacumulación, demostró que existe contaminación por As, Cd y Pb en niveles de moderado a fuerte, producto de los residuos mineros, poniendo en riesgo a las actividades agrícolas y ganaderas debido a la presencia de estos elementos considerados altamente nocivos para diferentes especies, particularmente el cadmio. Finalmente, Sonowal et al., (2022), manifiestan que el uso excesivo de agroquímicos contaminan los suelos con elementos tóxicos, para luego ser absorbidos y acumulados por algunas plantas, mejorando su eficacia con biosurfactantes producidos en la rizosfera. Jeyakumar et al., (2023), indican que la capacidad de movilización e inmovilización influye en la bioacumulación de ciertas especies frente a un determinado metal.

## CONCLUSIONES

En síntesis, la concentración en mg/kg de Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en los suelos con pastos cultivados asociados bajo riego, así como en los suelos con pastos naturales bajo el régimen de precipitaciones, superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de acuerdo a la norma peruana DS 011 2017 MINAM, constituyendo un riesgo ambiental para el agroecosistema de la irrigación Canal N. Además, se obtuvo una concentración ligeramente mayor de metales pesados en los suelos irrigados, lo cual se podría deber al aporte de estos elementos junto con partículas de limos, arcillas y materia orgánica en suspensión en las aguas de riego, favoreciendo la acumulación de metales pesados en los suelos.

En consecuencia, el factor de bioacumulación (FBA) de elementos traza en pasto cultivados asociados bajo riego y pastos naturales bajo régimen de precipitaciones, califican como exclusoras para Arsénico, Cadmio, Cromo y Plomo, y con un factor de bioacumulación de 7,5 para pastos cultivados y naturales califican como acumuladoras de Mercurio (Hg). Los metales pesados debido a su alta toxicidad, persistencia y contaminación constituyen una grave amenaza para los ecosistemas y la salud humana, por lo que la detoxificación del suelo es de suma importancia.

## AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Privada San Carlos de Puno por subsidiar la investigación.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor de iniciales (JWCO), no tiene conflictos de intereses de ninguna índole.

## REFERENCIAS

AGUIRRE, H.; VITERI, P.; LEÓN, P.; MAYÍA, Y.; COBOS, P.; MERO, M.; PERNÍA, B. Phytotoxicity of cadmium on the germination and initial growth of Ecuadorian maize varieties. Bioagro, v. 34, n. 1, 2022, p. 3-14. https://doi.org/10.51372/bioagro341.1

ALDERETE-SUAREZ, B.M.; VALLES-ARAGÓN, M.C.; CANALES-REYES, S.; PERALTA-PÉREZ, M.D.R.; ORRANTIA-BORUNDA, E. Bioconcentración de pb, cd y as en biomasa de *Eleocharis macrostachya* (Cyperaceae). Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, v. 35, n. 3, 2019, p. 93-101. https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp03.11

BABU, S.M.O.F.; HOSSAIN, M.B.; RAHMAN, M.S.; RAHMAN, M.; AHMED, A.S.S.; HASAN, M.M.; RAKIB, A.; EMRAN, T.; BIN, XIAO J.; SIMAL-GANDARA, J. Phytoremediation of toxic metals: A sustainable green solution for clean environment. Applied Sciences (Switzerland), v. 11, n. 21, 2021, p. 1-34. https://doi.org/10.3390/app112110348

BADAMASI, H.; OLUSOLA, J.A.; DURODOLA, S.S.; AKEREMALE, O.K.; ORE, O.T.; BAYODE, A.A. Contamination Levels, Source Apportionments, and Health Risks Evaluation of Heavy Metals from the Surface Water of the Riruwai Mining Area, North-Western Nigeria. Pollution, v. 9, n. 3, p. 2023, p. 929-949. https://doi.org/10.22059/POLL.2023.352517.1721

BALALI-MOOD, M.; NASERI, K.; TAHERGORABI, Z.; KHAZDAIR, M.R.; SADEGHI, M. Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. Frontiers in Pharmacology, v. 12, 2021, p. 1-19. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972

BARATHI, S.; LEE, J.; VENKATESAN, R.; VETCHER, A.A. Current Status of Biotechnological Approaches to Enhance the Phytoremediation of Heavy Metals in India—A Review. Plants, v. 12, n. 22, 2023, p. 1-19. https://doi.org/10.3390/plants12223816

BEDRIÑANA, J.C.; PEINADO, D.C.; PEÑALOZA-FERNÁNDEZ, R. Lead bioaccumulation in root and aerial part of natural and cultivated pastures in highly contaminated soils in Central Andes of Peru. Advances in Science, Technology and Engineering Systems, v. 5, n. 2, 2020, p. 126-132. https://doi.org/10.25046/aj050216

BURITIC, S.M.; GAST, J.; ABREGO, Z. Medicina de la conservación y enfermedades de la fauna silvestre. Capítulo 7 Efecto de los metales pesados sobre la diversidad: el caso del mercurio en quelonios. 2019, p. 83-98. https://revistas.udea.edu.co/index.php/biogenesis/issue/view/3454

CAHUANA-LIZARDO, O.A. Bioacumulación De Metales Pesados En Tejidos De Vegetación Acuática. Revista De Medio Ambiente Minero Y Minería, v. 4, n. 2, 2019, p. 19-36.

CANO-OJEDA, JULIO-WILFREDO. Metales pesados y fertilidad de los suelos de la irrigación Canal N, Puno, Perú. Manglar, v. 18, n. 4, 2021, p. 419-426. http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.054

CASTRO-GONZÁLEZ, N.P.; CALDERÓN-SÁNCHEZ, F.; MORENO-ROJAS, R.; TAMARIZ-FLORES, J.V.; REYES-CERVANTES, E. Nivel De Contaminación De Metales Y Arsénico En Aguas Residuales Y Suelos En La Subcuenca Del Alto Balsas En Tlaxcala Y Puebla, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, v. 35, n. 2, 2019, p. 335-348. https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.06

CHEN, X.; ZHANG, Z.; SONG, X.; DENG, Z.; XU, C. Ecotoxicology and Environmental Safety Interspecific root interaction enhances cadmium accumulation in Oryza sativa when intercropping with cadmium accumulator Artemisia argyi. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 269, 2024, 115788. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115788

CORRAL-RIBERA, M. Factor bioconcentración en Ailanthus altissima (Mill.) Swingle. Análisis preliminar. Cuadernos Geográficos, v. 61, n. 1, 2022, p.189-205. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.20952

CORREA-CUBA, O. Contaminación Por Metales Pesados De La Microcuenca Agropecuaria Del Río Huancaray–Perú. Revista de la Sociedad Química del Perú, v. 87, n. 1, 2021, p. 26-38. https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320

DE LA CUEVA, F.; NARANJO, A.; TORRES, B.P.; ARAGÓN, E. Presence of heavy metals in raw bovine milk from Machachi, Ecuador. Granja, v. 33, n. 1, 2021, p. 21-30. https://doi.org/10.17163/LGR.N33.2021.02

DÍAZ-CARTAGENA, J. Factores que determinan el origen de la contaminación de suelos por arsénico en la comunidad de Llacuabamba, Pataz, mediante procedimientos secuenciales y alternos [Tesis doctor]. San Marcos (Perú): Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.

MARTYÍNEZ-MERA, ELIANA-ANDREA; TORREGOZA-ESPINOSA, ANA-CAROLINA, CRISSIEN-BORRERO, TITO-JOSÉ; MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ-LUIS; GONZÁLEZ-MÁRQUES, LUIS-CARLOS. Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia. Heliyon, v. 5, n. 8, 2019. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02217

FERNANDEZ-OCHOA, B.H. Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, v. 24, n. 2, 2022, p. 131-138. https://doi.org/10.18271/ria.2022.416

FERTILAB. Los Metales Pesados y su Efecto Contaminante. 2020. https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/190-Metales-Pesados-y-su-Efecto-Contaminante.pdf

GEETHA, A.; BHAVYA, K.; SAIDAIAH, P. Phytoremediation as a novel approaches to revegetation of heavy metal in polluted soil. The Pharma Innovation, v. 11, n. 12, 2022, p. 6129-6137.

GONZALEZ, M.A.; CAZÓN, P.; LAURA, W. Resúmenes de Jornadas en Ciencias Biológicas Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados utilizando especies nativas : criterios de selección y estudio de su capacidad de bioacumulación, v. 9, n. 2, 2022, p. 54-55.

GUZMÁN-CASTRO, V.; RAZO-ZÁRATE, R.; VÁZQUEZ-CUEVAS, G.M.; HERNÁNDEZ-JUÁREZ, M. Factores que condicionan la empleabilidad de las plantas en fitorremediación. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, v. 10, n. 19, 2022, p. 42-49. https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.9193

HERNÁNDEZ, Y.; RODRÍGUEZ, P.; CARTAYA, O. Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate Yanitza Meriño-Hernández 4. Cultivos Tropicales, v. 40, n. 3, 2019, 10. http://ediciones.inca.edu.cu

JARA-PEÑA, E.J. Acumulación de metales pesados en Calamagrostis rigida (Kunth) Trin. ex Steud. (Poaceae) y Myriophyllum quitense Kunth (Haloragaceae) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. Arnaldoa, v. 2, n. 2, 2017, p. 583-598. https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210

JEYAKUMAR, P.; DEBNATH, C.; VIJAYARAGHAVAN, R.; MUTHURAJ, M. Trends in Bioremediation of Heavy Metal Contaminations. Environmental Engineering Research, v. 28, n. 4, 2023, p. 0-2. https://doi.org/10.4491/eer.2021.631

JIN, X.; JIA, T.; LIU, R.; XU, S. The antagonistic effect of selenium on cadmium-induced apoptosis via PPAR-Γ/PI3K/Akt pathway in chicken pancreas. Journal of Hazardous Materials, v. 357, (Cyt C), 2018, p. 355-362. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.003

KHAN, S.; MASOODI, T.H.; PALA, N.A.; MURTAZA, S.; MUGLOO, J.A.; SOFI, P.A.; ZAMAN, M.U.; KUMAR, R.; KUMAR, A. Phytoremediation Prospects for Restoration of Contamination in the Natural Ecosystems. Water, v. 15, n. 8, 2023 . https://doi.org/10.3390/w15081498

LEYTE, J.; GONZÁLEZ, L.; GUTIERREZ, O.; MÁRQUEZ, L.; DEL CRISTO, T. Characterization of three bioindicators of pollution by heavy metals. Revista Cubana de Quimica, v. 32, n. 2, 2019, p. 293-308. https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4902/4249

LIU, W.; YANG, X.; DUAN, L.; NAIDU, R.; YAN, K.; LIU, Y.; WANG, X.; GAO, Y.; CHEN, Y. Variability in plant trace element uptake across different crops, soil contamination levels and soil properties in the Xinjiang Uygur Autonomous Region of northwest China. Scientific Reports, n. 11, n. 1, 2021, p. 1-13. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81764-w

LIZARDO, C.; ADUVIRE, OSVALDO. Evaluación Del Efecto Bioacumulador En Vegetación Terrestre De Las Especies Trifolium Repens "Trébol" Y Calamagrostis Sp. "Ichu" En Áreas Mineras Abandonadas. Suparyanto dan Rosad, 2015, v. 5, n. 3, 2020, p. 248-253. http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v6n2/v6n2_a01.pdf

LÓPEZ-HERNÁNDEZ, M.E.; MORALES-HERNÁNDEZ, O.E. Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. Revista Ciencia y Tecnología El Higo, v. 12, n. 2, 1, 2022, p. 5-28. https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197

MAHMMOD, R.H.; NAJAM, L.A.; WAIS, T.Y.; MANSOUR, H. Assessment of the Pollution of some Heavy Metals in the Sediments of the Tigris River in the City of Mosul-Northern Iraq. Pollution, v. 9, n. 2, 2023, p. 646-659. https://doi.org/10.22059/POLL.2022.348104.1611

MARTÍNEZ-MANCHEGO, L.; SARMIENTO-SARMIENTO, G.; BOCARDO-DELGADO, E. Especies vegetales nativas con potencial para la fitorremediación de suelos alto andinos contaminados por residuos de actividad minera. BioAgro, v. 33, n. 3, 2021, p. 161-170. http://www.doi.org/10.51372/bioagro333.2

NASSIMA, E.; ABDELAZIZ, A.M.; KHADIJA, F.; EL-FADELI, S.; ALAIN, P.; YASSIR, B. Impact of Mining Activity on Soils and Plants in the Vicinity of a Zn-Pb Mine (Draa Lasfar, Marrakech - Morocco). Pollution, v. 9, n. 2, 2023, p. 615-627. https://doi.org/10.22059/POLL.2022.348075.1606

NEDJIMI, B. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. SN Applied Sciences, v. 3, n. 3, 2021, p. 1-19. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4

NNAJI, N.D.; ONYEAKA, H.; MIRI, T.; UGWA, C. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. SN Applied Sciences, v. 5, n. 5, 2023. https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6

NOVOA-VILLA, H.H.; ARIZACA-ÁVALOS, A.; HUISA MAMANI, F. Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, v. 24, n. 3, 2022, p. 182-189. https://doi.org/10.18271/ria.2022.361

NYIKA, J.; DINKA, M.O. Heavy Metal Pollution in Soils and Vegetables from Suburban Regions of Nairobi, Kenya and their Community Health Implications. Pollution, v. 8, n. 4, 2022, p. 1434-1447. https://doi.org/10.22059/POLL.2022.341522.1440

ORÉ-CIERTO, L.E.; QUISPICHO ESPINOZA, S.T.; LOARTE-ALIAGA, W.C.; ORÉ CIERTO, J.D.; LÓPEZ LÓPEZ, C.S. Calidad ambiental del agua del Rio Bella y Supte Chico – Huánuco. FitoVida, v. 1, n. 1, 2022, p. 41-55. https://doi.org/10.56275/fitovida.v1i1.6

PRAKASH, P.; S.S.C. Nano-Phytoremediation of Heavy Metals from Soil: A Critical Review. Pollutants, v. 3, n. 3, 2023, p. 360-380. https://doi.org/10.3390/pollutants3030025

QUIJADA-CARO, E.E. ; Bioacumulación y transferencia de plomo desde el suelo a los pastos y leche en la estación experimental El Mantaro, v. 3, n. 2, 2021, 6. http://hdl.handle.net/20.500.12894/6935

QUISPE-QUEZADA, U.R.; QUISPE-RODRÍGUEZ, J.; CASAS-REÁTEGUI, R.; HUAMANI-URPE, I.L.; HINOJOSA-BENAVIDES, R.A. Concentración de metales pesados en cultivares de Persea americana, Luricocha, Huanta. Revista Alfa, v. 7, n. 20, 2023, p. 376-386. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.222

REYNA, S.; ARTEAGA, J. La Granja, Revista de Ciencias de la Vida, Universidad Politécnica Salesiana, E. Riesgos de contaminación química en leche y sus derivados, v. 36, n. 2, 2022, p. 122-134. https://doi. org/10. 17163/lgr. n36. 2022. 1. (2022).

SALAZAR-CAMACHO, C.; SALAS-MORENO, M.; PATERNINA-URIBE, R.; MARRUGO-NEGRETE, J.; DÍEZ, S. Dataset of concentrations of mercury and methylmercury in fish from a tropical river impacted by gold mining in the Colombian Pacific. Data in Brief, v. 33, 2020, 106513. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106513

SHAHRIARI, T.; SOLTANIAN, M.; SALMAK, S. Review of Phytoremediation for Arsenic-Contaminated Soils: Mechanisms and Challenges. Journal of pollution, v. 9, n. 4, 2023, p. 1935-1951. https://jpoll.ut.ac.ir/article_94023.html

SINGH, A.; KHANNA, K.; KOUR, J.; DHIMAN, S.; BHARDWAJ, T. Revisión crítica sobre la dinámica biogeoquímica del mercurio ( Hg ) y sus estrategias de abatimiento. Chemosphere, v. 319, 2023, 137917. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137917

SONOWAL, S.; NAVA, A.R.; JOSHI, S.J.; BORAH, S.N.; ISLAM, N.F.; PANDIT, S.; PRASAD, R.; SARMA, H. Biosurfactant-assisted phytoremediation of potentially toxic elements in soil: Green technology for meeting the United Nations Sustainable Development Goals. Pedosphere, v. 32, n. 1, 2022, p. 198-210. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60067-X

TAGHAVI, M.; DARVISHIYAN, M.; MOMENI, M.; ESLAMI, H.; FALLAHZADEH, R.A.; ZAREI, A. Ecological risk assessment of trace elements (TEs) pollution and human health risk exposure in agricultural soils used for saffron cultivation. Scientific Reports, v. 13, n. 1, 2023, p. 1-15. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31681-x

TUN-CANTO, G.E.; ÁLVAREZ-LEGORRETA, T.; ZAPATA-BUENFIL, G.; SOSA-CORDERO, E. Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo, México. Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, v. 34, n. 3, 2017, p. 157-169. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.433

VASILACHI, I.C.; STOLERU, V.; GAVRILESCU, M. Analysis of Heavy Metal Impacts on Cereal Crop Growth and Development in Contaminated Soils. Agriculture, v. 13, n. 10, 2023. https://doi.org/10.3390/agriculture13101983

VEGA, A.; DELGADO, N.; HANDFORD, M. Exogenous Application of Organic AcidsIncreasing Heavy Metal Tolerance by the. International Journal of Molecular Sciences, v. 23, n. 10, 2022. https://doi.org/10.3390/ijms23105438

VELÁZQUEZ-CHÁVEZ, L.D.J.; ORTIZ-SÁNCHEZ, I.A.; CHÁVEZ-SIMENTAL, J.A.; PÁMANES-CARRASCO, G.A.; CARRILLO-PARRA, A.; PEREDA-SOLÍS, M.E. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, v. 25, 2023, p. 1-13. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482

YADAV, M.; SHARMA, P. Current Eco-friendly and Sustainable Methods for Heavy Metals Remediation of Contaminated Soil and Water: Special Emphasis on Use of Genetic Engineering and Nanotechnology. Pollution, v. 9, n. 3, 2023, p. 1028-1048. https://doi.org/10.22059/poll.2023.345177.1522

ZHAO, G.; MA, Y.; LIU, Y.; CHENG, J.; WANG, X. Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around heavy metal industry in Anxin County. Scientific Reports, v. 12, n. 1, 2022, p. 1-17. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13977-6