

## **Distribución, variabilidad estacional y bioacumulación de metales pesados en agua, sedimentos y vegetación en pueblo nuevo Lircay, Huancavelica**

## **Distribution, Seasonal Variability, and Bioaccumulation of Heavy Metals in Water, Sediments, and Vegetation in Pueblo Nuevo Lircay, Huancavelica**

**Gabriel Ramírez-Huincho**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [gabriel.ramirez@unh.edu.pe](mailto:gabriel.ramirez@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-7690>

**Andrés Zósimo Nahui-Gaspar**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [andres.gaspar@unh.edu.pe](mailto:andres.gaspar@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9038-9632>

**Johnnathan Ruber Vilcapoma-Juño**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [johnnathan.vilcapoma@unh.edu.pe](mailto:johnnathan.vilcapoma@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-440>

**Demetrio Soto-Carbajal**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [demetrio.soto@unh.edu.pe](mailto:demetrio.soto@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9971-203X>

### **Resumen**

El presente estudio evaluó la distribución espacial, variabilidad estacional y relación entre las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en agua superficial, sedimentos y vegetación en una zona de influencia minera altoandina en Huancavelica, Perú. Empleamos un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental longitudinal, comparando dos campañas de muestreo: estación lluviosa (marzo de 2025) y época seca (agosto de 2025). Los resultados evidenciaron un comportamiento diferencial entre matrices ambientales. En agua, el Zn presentó las mayores superaciones respecto a los estándares ambientales durante la época seca, asociado a procesos de concentración por reducción del caudal. En sedimentos, el As alcanzó las concentraciones más elevadas, particularmente en la laguna, confirmando su papel como sumidero geoquímico. La vegetación mostró la señal más intensa de impacto, con bioacumulación significativa de metales y superación de valores máximos tolerables, especialmente para Cd y Pb. Se



*Scientific Research Journal*

Centro de Investigación y Desarrollo Intelectual CIDI

E-ISSN: 2789-2727 / Vol. 7, Núm. 11, 20-41, Abril 2026 / [www.srjournalcidi.org](http://www.srjournalcidi.org)

<https://doi.org/10.53942/srjcdi.v7i11.324>

concluye que la dinámica de los metales pesados está fuertemente modulada por la estacionalidad y la interacción entre matrices ambientales, evidenciando la necesidad de monitoreos multicompartimentales en zonas de influencia minera.

### **Palabras clave**

metales pesados; agua superficial; sedimentos; bioacumulación; vegetación; actividad minera.

### **Abstract**

The present study evaluated the spatial distribution, seasonal variability, and relationships among concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), and zinc (Zn) in surface water, sediments, and vegetation within a mining-influenced high-Andean area in Huancavelica, Peru. A quantitative approach was applied using a non-experimental longitudinal design, comparing two sampling campaigns: the rainy season (March 2025) and the dry season (August 2025). The results revealed a differential behavior among environmental matrices. In water, Zn showed the highest exceedances relative to environmental quality standards during the dry season, associated with concentration processes due to reduced flow. In sediments, As reached the highest concentrations, particularly in the lagoon, confirming its role as a geochemical sink. Vegetation exhibited the strongest signal of environmental impact, with significant bioaccumulation of metals and exceedance of maximum tolerable values, especially for Cd and Pb. It is concluded that the dynamics of heavy metals are strongly modulated by seasonality and the interaction among environmental matrices, highlighting the need for multicompartment monitoring in mining-influenced areas.

### **Keywords**

heavy metals; surface water; sediments; bioaccumulation; vegetation; mining activity.



## Zusammenfassung

Diese Studie untersuchte die räumliche Verteilung, saisonale Variabilität und die Zusammenhänge der Konzentrationen von Arsen (As), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Zink (Zn) in Oberflächenwasser, Sedimenten und Vegetation in einem bergbaulich beeinflussten hochandinen Gebiet in Huancavelica, Peru. Es wurde ein quantitativer Ansatz mit einem nicht-experimentellen Längsschnittdesign angewendet, wobei zwei Probenahmekampagnen verglichen wurden: die Regenzeit (März 2025) und die Trockenzeit (August 2025). Die Ergebnisse zeigten ein unterschiedliches Verhalten zwischen den Umweltkompartimenten. Im Wasser wies Zink während der Trockenzeit die höchsten Überschreitungen im Vergleich zu Umweltqualitätsstandards auf, was auf Konzentrationsprozesse infolge reduzierter Wasserführung zurückzuführen ist. In den Sedimenten erreichte Arsen die höchsten Konzentrationen, insbesondere in der Lagune, was seine Rolle als geochemische Senke bestätigt. Die Vegetation zeigte das deutlichste Signal der Umweltbelastung, mit signifikanter Bioakkumulation von Metallen und Überschreitung maximal tolerierbarer Werte, insbesondere für Cadmium und Blei. Es wird geschlussfolgert, dass die Dynamik der Schwermetalle stark durch die Saisonalität und die Wechselwirkungen zwischen den Umweltkompartimenten beeinflusst wird, was die Notwendigkeit eines multikompartimentellen Monitorings in bergbaulich beeinflussten Gebieten unterstreicht.

## Schlüsselwörter

Schwermetalle; Oberflächenwasser; Sedimente; Bioakkumulation; Vegetation; Bergbauaktivität.



## 1. Introducción

La evidencia internacional sobre la contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos influenciados por actividades antrópicas, en ecosistemas altoandinos del Perú, particularmente en Huancavelica, persisten vacíos de información sobre su comportamiento integrado entre agua superficial, sedimentos y vegetación, así como su variabilidad bajo condiciones estacionales contrastantes. Esta limitación restringe la comprensión de los procesos de movilidad, acumulación y transferencia ecológica en zonas de influencia minera.

Los metales pesados representan una problemática ambiental prioritaria debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación en cuencas sometidas a presión minera. Estos elementos pueden movilizarse hacia cuerpos de agua, acumularse en sedimentos y transferirse a la vegetación, generando riesgos ecológicos y potenciales impactos en la salud humana (Akhtar et al., 2021; Ali et al., 2019). Su dinámica está controlada por factores fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica, el potencial redox y la materia orgánica, lo que determina su comportamiento diferencial entre matrices ambientales.

En este contexto, el agua superficial actúa como medio de transporte, los sedimentos como sumidero geoquímico y la vegetación como indicador de exposición crónica y bioacumulación. Asimismo, en ecosistemas de montaña, la estacionalidad climática modula significativamente la movilidad de los metales: durante la estación lluviosa predominan procesos de escorrentía y lixiviación, mientras que en época seca la reducción del caudal favorece la concentración de contaminantes (Hatje et al., 2022).

En el contexto peruano, los estudios existentes suelen abordar matrices ambientales de forma aislada, lo que limita una evaluación integral del sistema. Esta brecha es particularmente relevante en el anexo Pueblo Nuevo–Lircay (Huancavelica), donde la actividad minera y la proximidad de cuerpos de agua de uso local incrementan el riesgo de deterioro ambiental.



El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la distribución espacial, la variabilidad estacional y la relación entre las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en agua superficial, sedimentos y vegetación en tres puntos de muestreo, durante la estación lluviosa y la época seca. Específicamente, se buscó: (i) caracterizar espacialmente los sitios de estudio, (ii) comparar las concentraciones entre campañas estacionales, (iii) contrastar los resultados con estándares ambientales y (iv) analizar la relación entre matrices para identificar patrones de movilidad, acumulación y bioacumulación asociados a la influencia minera.

## **2. Estado del arte o Marco Teórico**

La contaminación por metales pesados es un fenómeno complejo influenciado por factores naturales y antropogénicos. Según (Enamorado Montes et al., 2021) metales como arsénico, plomo y cadmio son persistentes y bioacumulables, representando riesgos toxicológicos. En Perú, la minería es una fuente principal de contaminación, como lo demuestran estudios en Cerro de Pasco (Castillo Corzo et al., 2025) y la Laguna Patón (Rivera, 2021) Además, el cambio climático modula la movilidad de metales a través de variaciones en precipitación y temperatura, exacerbando la contaminación en épocas de lluvias intensas (Rivera, 2021). La bioacumulación en plantas, como *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla*, indica la transferencia de metales a la cadena alimentaria, requiriendo monitoreo y mitigación.

### **2.1. Contaminación por Metales Pesados y Toxicidad**

La contaminación de cuerpos hídricos por metales pesados es una problemática de gran relevancia técnica debido a la persistencia, toxicidad y bioacumulación de estos elementos. Metales como el cadmio y el plomo son clasificados como metales sin función biológica conocida, lo que significa que su presencia en organismos vivos, incluso en bajas concentraciones, puede causar efectos tóxicos severos y daños en sistemas biológicos.



## 2.2. Dinámica de Bioacumulación en la Cadena Trófica

Los metales pesados tienden a bioacumularse en microorganismos, suelos y plantas, provocando un incremento progresivo de su toxicidad a medida que avanzan en la cadena trófica. En las plantas, este proceso ocurre principalmente por absorción radicular, una amenaza para el bienestar de las personas y animal al ingresar a la cadena alimentaria.

## 2.3. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

En el marco regulatorio peruano, los ECA constituyen la referencia para determinar las concentraciones admisibles de elementos en el medio ambiente, garantizando que no se generen impactos negativos. Para los fines de este trabajo, se toman como referencia vinculante los valores estipulados en el D.S. N.º 004-2017-MINAM, norma que establece los criterios para la conservación del recurso hídrico.

## 2.4. Factores de Movilización: Actividades Antropogénicas y Cambio Climático

La existencia de metales en el ecosistema de Pueblo Nuevo-Lircay se debe a dos fuentes principales:

**2.4.1 Actividades Antropogénicas:** Principalmente la explotación minera (como la Mina Salomina Pucacocha), descargas industriales y el uso de agroquímicos en la agricultura, que movilizan metales hacia el entorno.

**2.4.2 Cambio Climático:** La variabilidad estacional influye críticamente en la movilidad de los metales. Las lluvias intensas favorecen la lixiviación y dispersión de contaminantes por escorrentía, mientras que la sequía provoca procesos de evaporación que concentran los metales en cuerpos hídricos reducidos.

## 3. Materiales y métodos

La investigación fue de enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con nivel descriptivo-correlacional y diseño no experimental longitudinal, bajo un carácter observacional comparativo. El estudio se desarrolló en el anexo Pueblo Nuevo Lircay, provincia de Angaraes, región Huancavelica, Perú, considerando tres cuerpos de agua representativos: el río Tambranco, la laguna Pucacocha y el reservorio Uchcu Cacca. Se realizaron dos



campañas de muestreo correspondientes a la estación lluviosa (marzo de 2025) y la época seca (agosto de 2025), con la finalidad de evaluar la variabilidad estacional de metales pesados en diferentes matrices ambientales.

Se recolectaron muestras de agua superficial, sedimentos superficiales y vegetación ribereña, principalmente *Stipa (ichu)* y *Pennisetum clandestinum (Kiyuyo)*. En la matriz agua se midieron in situ los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica y temperatura, utilizando equipos previamente calibrados. Posteriormente, las muestras fueron preservadas y transportadas bajo condiciones controladas a un laboratorio acreditado para la determinación de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn).

El muestreo de sedimentos se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017), incluyendo procesos de secado, homogeneización, tamizado y digestión ácida. Las muestras de vegetación fueron previamente limpiadas para eliminar partículas adheridas, secadas, trituradas y sometidas a digestión Química antes de su análisis. La determinación de metales se efectuó mediante métodos instrumentales validados en laboratorio acreditado, bajo criterios de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), que incluyeron calibración de equipos, análisis de blancos, duplicados, uso de materiales de referencia certificados y verificación de límites de detección.

La selección de los metales analizados (As, Cd, Pb y Zn) se basó en su relevancia ecotoxicológica, su asociación con actividades mineras y su comportamiento diferencial en matrices ambientales. Los datos fueron organizados según punto de muestreo, periodo estacional y matriz ambiental. Se aplicó estadística descriptiva mediante medidas de tendencia central y dispersión, así como pruebas comparativas entre épocas (t de Student y U de Mann–Whitney), dependiendo de la distribución de los datos, considerando un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ . Asimismo, se realizaron análisis de correlación (Pearson y Spearman) para evaluar la relación entre matrices ambientales.

Los resultados de las pruebas estadísticas evidenciaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre la época seca y lluviosa para arsénico en agua ( $p = 0.041$ ), sedimentos ( $p =$



0.028) y vegetación ( $p = 0.003$ ), así como para cadmio en sedimentos ( $p = 0.049$ ) y plomo en sedimentos ( $p = 0.019$ ) y vegetación ( $p < 0.001$ ), lo que confirma la influencia de la estacionalidad en la variación de estos metales. En contraste, el zinc en agua ( $p = 0.088$ ) y el cadmio en agua ( $p = 0.117$ ) no presentaron diferencias significativas entre épocas.

Finalmente, los resultados fueron contrastados con estándares de calidad ambiental vigentes y valores de referencia reportados en la literatura científica. Dado el carácter exploratorio del estudio y el tamaño muestral, la interpretación se realizó desde un enfoque descriptivo-integrado, orientado a identificar patrones de distribución, movilidad y bioacumulación de metales pesados en el sistema evaluado.

#### 4. Resultados

##### 4.1. Distribución espacial de los puntos de muestreo

La investigación se desarrolló en tres estaciones de muestreo representativas del sistema hídrico del anexo Pueblo Nuevo, comunidad de San Juan de Dios, distrito de Lircay, provincia de Angaraes, región Huancavelica. Los puntos fueron georreferenciados mediante coordenadas UTM, permitiendo la localización precisa de las estaciones para las tres matrices ambientales evaluadas (agua, sedimentos y vegetación).

**Tabla 1.** *Coordenadas de los puntos de muestreo en las campañas (época seca y lluviosa).*

Puntos de muestreo	Coordenada UTM Este	Coordenada UTM Norte	Ubicación / descripción
AG-01 / SAG-01 / PAG-01	524854	8554952	Río del C.P. Pueblo Nuevo (Río Tambaico)
AG-02 / SAG-02 / PAG-02	524589	8555015	Reservorio del C.P. Pueblo Nuevo (Reservorio Uchcu Ccacca)
AG-03 / SAG-03 / PAG-03	524779	8554960	Laguna del C.P. Pueblo Nuevo (Laguna Pucacocha)

##### 4.2. Concentración de metales pesados en agua superficial

Las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en agua superficial mostraron variaciones según el tipo de cuerpo hídrico y la época de muestreo.



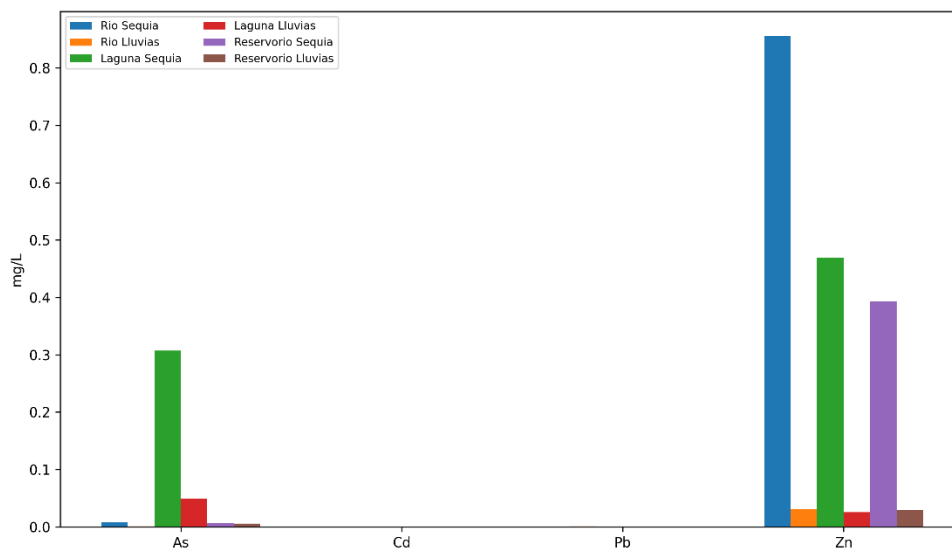
La Tabla 2 resume los valores obtenidos para las estaciones río, laguna y reservorio durante sequía y lluvias. Los resultados indican que el arsénico y el zinc alcanzaron sus máximas concentraciones durante la época seca, mientras que el plomo fue más evidente en la época lluviosa.

**Tabla 2.** Concentración de metales totales en agua superficial (mg/L)

Metal	Río (AG-01) Sequía	Río (AG-01) Lluvias	Laguna (AG-03) Sequía	Laguna (AG-03) Lluvias	Reservorio (AG-02) Sequía	Reservorio (AG-02) Lluvias
Arsénico (As)	0.008	0.00128	0.307	0.04917	0.006	0.00565
Cadmio (Cd)	0.0002	<0.00006	0.0006	<0.00006	0.0003	<0.00006
Plomo (Pb)	<0.0005	0.00133	<0.0005	0.00065	<0.0005	0.00065
Zinc (Zn)	0.856	0.0312	0.469	0.0259	0.393	0.0292

**Nota.** Los valores inferiores al límite de detección se reportan con el símbolo “<”.

**Figura 1.** Concentración de metales en agua según medio y época de muestreo



En la matriz agua, el arsénico presentó su mayor concentración en la laguna durante sequía (0.307 mg/L), seguido del río y reservorio con valores notablemente menores. El cadmio se detectó en bajas concentraciones en sequía y permaneció por debajo del límite de detección en lluvias. El plomo fue más evidente en la época lluviosa, particularmente en



el río (0.00133 mg/L), lo que sugiere movilización por escorrentía superficial. El zinc alcanzó sus máximos en el río durante sequía (0.856 mg/L), con disminución marcada en lluvias, compatible con procesos de concentración en estiaje y dilución en temporada húmeda. En conjunto, la laguna y el río constituyen los medios más sensibles para la acumulación y movilización de metales en agua superficial.

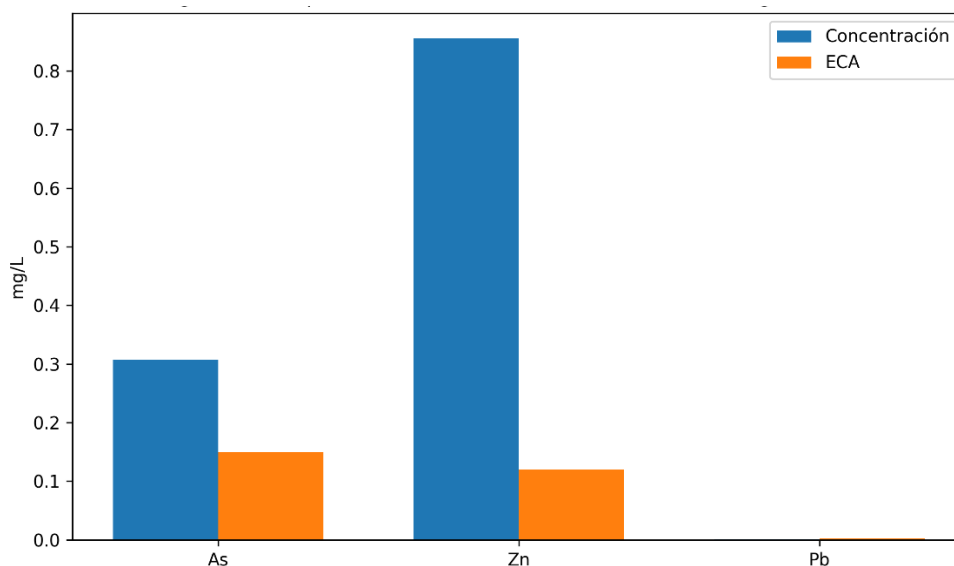
#### 4.3. Comparación de metales en agua con los ECA

Con el fin de evaluar la relevancia ambiental de los resultados obtenidos en agua, se compararon las concentraciones máximas registradas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) aplicables.

**Tabla 3.** Comparación de concentraciones máximas en agua con ECA

Metal	Medio crítico	Época	Concentración máxima (mg/L)	ECA (mg/L)	Cumplimiento
Arsénico (As)	Laguna	Sequía	0.307	0.15	No cumple
Zinc (Zn)	Río	Sequía	0.856	0.12	No cumple
Plomo (Pb)	Río	Lluvias	0.00133	0.0025	Cumple

**Figura 2.** Comparación de concentraciones máximas en agua frente a ECA



La comparación con los ECA evidenció que el arsénico en la laguna y el zinc en el río superaron los valores de referencia durante la época seca, constituyéndose en los hallazgos



más críticos de la matriz acuática. En contraste, el plomo se mantuvo por debajo del estándar, incluso durante lluvias. Estos resultados indican que la laguna Pucacocha y el río Tambranco presentan mayor susceptibilidad a procesos de contaminación por metales en condiciones de menor caudal.

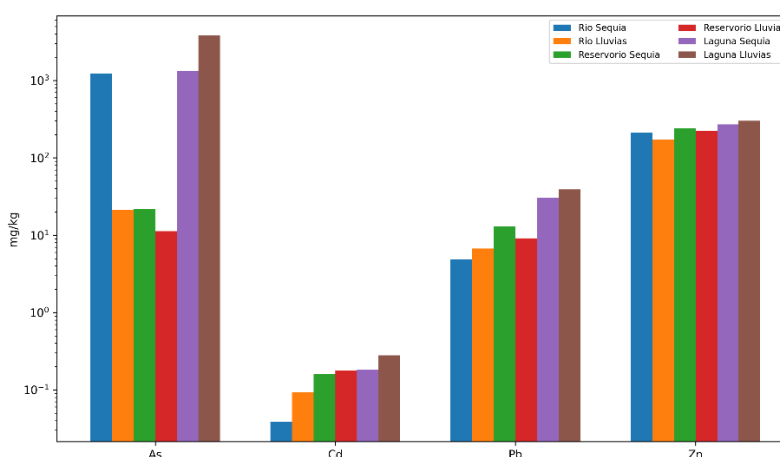
#### 4.4. Concentración de metales pesados en sedimentos

Los sedimentos superficiales mostraron las mayores concentraciones absolutas de metales entre las tres matrices analizadas, lo que confirma su función como sumidero geoquímico.

**Tabla 4.** Resume los valores de arsénico, cadmio, plomo y zinc en río, reservorio y laguna durante sequía y lluvia.

Metal	Río (SAG-01) Sequía	Río (SAG-01) Lluvias	Reservorio (SAG-02) Sequía	Reservorio (SAG-02) Lluvias	Laguna (SAG-03) Sequía	Laguna (SAG-03) Lluvias
Arsénico (As)	1237	21.24	21.6	11.28	1340	3861
Cadmio (Cd)	0.03816	0.0924	0.1584	0.1756	0.18374	0.2787
Plomo (Pb)	4.91	6.73	13.05	9.12	30.35	38.9
Zinc (Zn)	212.5	172.45	240.15	221.7	270.85	300.12

**Figura 3.** Concentración de metales en sedimentos según medio y época de muestreo



El arsénico fue el metal dominante en sedimentos, con concentraciones extremadamente elevadas en el río durante sequía (1237 mg/kg) y, sobre todo, en la laguna durante lluvias (3861 mg/kg). El zinc también mostró concentraciones altas en todos los medios, con máximos en la laguna (300.12 mg/kg). El plomo y el cadmio permanecieron en niveles menores, aunque con tendencia al incremento en lluvias, especialmente en la laguna. La laguna Pucacocha destacó como el compartimento de mayor retención y acumulación de metales, lo que es coherente con su menor energía hidráulica y mayor capacidad de sedimentación.

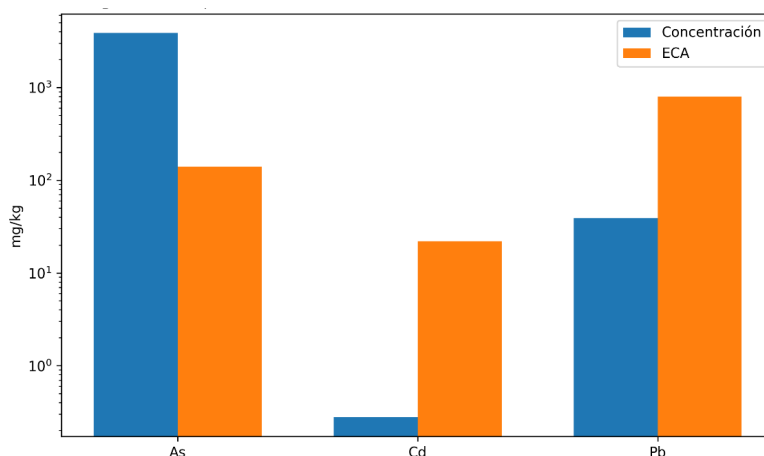
#### 4.5. Comparación de metales en sedimentos con ECA de suelo

La comparación de las concentraciones críticas de sedimentos con los estándares referenciales de suelo permitió identificar el metal de mayor preocupación ambiental.

**Tabla 5.** Resumen de los principales hallazgos.

Metal	Medio crítico	Época	Concentración máxima (mg/kg)	ECA suelo (mg/kg)	Cumplimiento
Arsénico (As)	Laguna	Lluvias	3861	140	No cumple
Arsénico (As)	Río	Sequía	1237	140	No cumple
Cadmio (Cd)	Laguna	Lluvias	0.2787	22	Cumple
Plomo (Pb)	Laguna	Lluvias	38.9	800	Cumple

**Figura 4.** Comparación de concentraciones críticas en sedimentos frente a los ECA de suelo



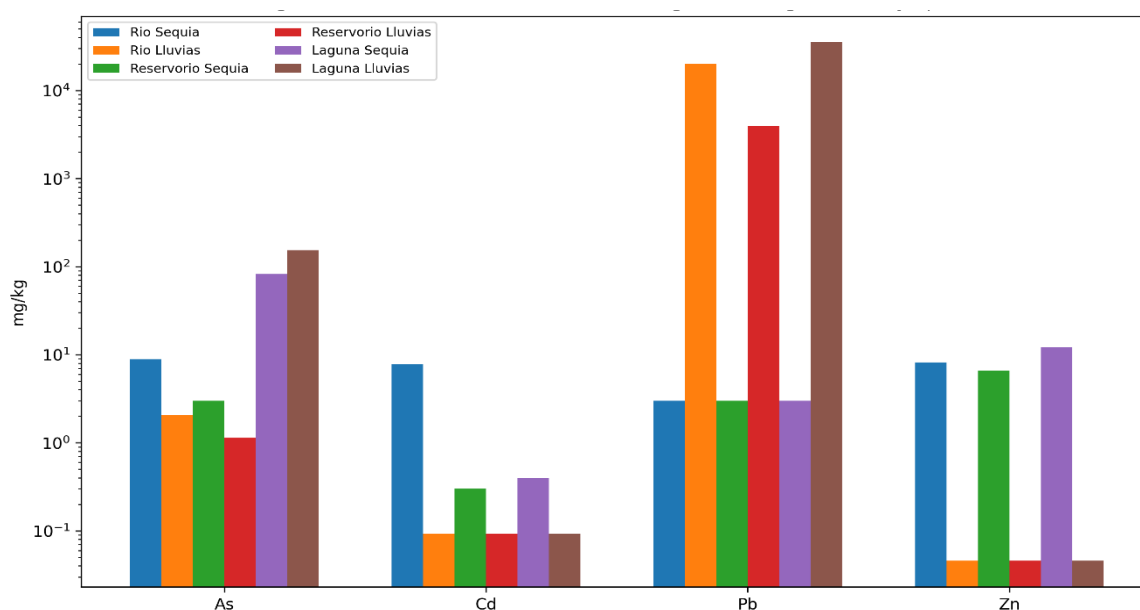
El arsénico en sedimentos constituye el principal hallazgo de contaminación del estudio, al superar ampliamente el estándar de referencia tanto en el río como en la laguna, con especial gravedad en esta última durante lluvias. En contraste, el cadmio y el plomo permanecieron por debajo de los límites referenciales. Esto sugiere un patrón de contaminación persistente y acumulativa asociado a la deposición de partículas finas y al arrastre de material contaminado en el sistema lacustre.

#### 4.6. Concentración de metales pesados en vegetación ribereña

**Tabla 6.** Concentración de metales totales en vegetación ribereña (mg/kg)

Metal	Río (PAG-01) Sequía	Río (PAG-01) Lluvias	Reservorio (PAG-02) Sequía	Reservorio (PAG-02) Lluvias	Laguna (PAG-03) Sequía	Laguna (PAG-03) Lluvias
Arsénico (As)	8.9	2.066	<3.0	1.141	82.4	154.4
Cadmio (Cd)	7.8	0.0924	<0.3	0.0924	0.4	0.0924
Plomo (Pb)	<3.0	20063	<3.0	3959	<3.0	35384
Zinc (Zn)	8.2	<0.0456	6.6	<0.0456	12.1	<0.0456

**Figura 5.** Concentración de metales en vegetación ribereña según medio y época de muestreo



En vegetación ribereña, el arsénico mostró mayor acumulación en la laguna, con 82.4 mg/kg en sequía y 154.4 mg/kg en lluvias, lo que sugiere transferencia desde sedimentos y/o material particulado. El cadmio alcanzó su máximo en el río durante sequía (7.8 mg/kg), mientras que el zinc permaneció en concentraciones relativamente bajas. El plomo, en cambio, presentó valores extraordinariamente altos en la época lluviosa, especialmente en la laguna (35384 mg/kg) y el río (20063 mg/kg). Estos resultados inusuales presentan como hallazgos atípicos compatibles con bioacumulación extrema, deposición superficial intensa o posible sesgo analítico, más que como un patrón regular del Sistema.

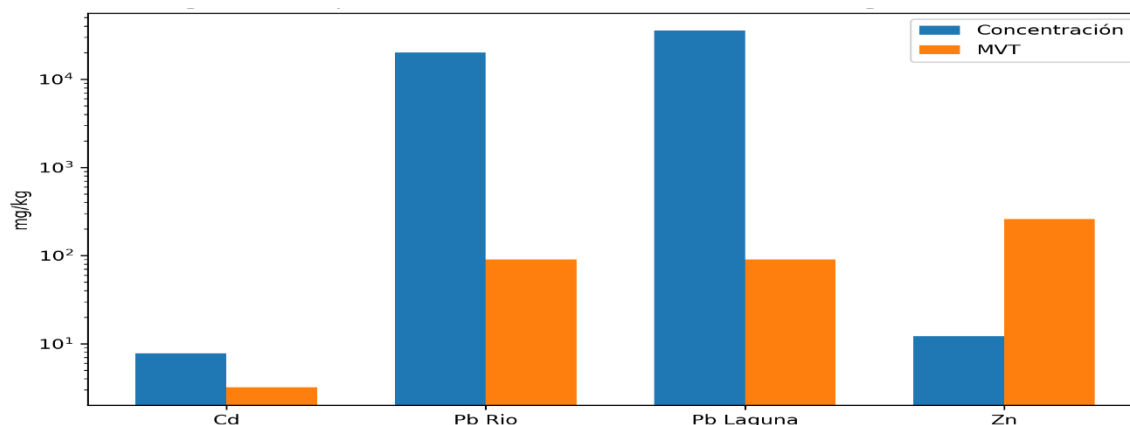
#### 4.7. Comparación de metales en vegetación con MVT

La comparación de los valores máximos observados en vegetación con los MVT permitió identificar excedencias importantes, especialmente para cadmio y plomo.

**Tabla 7.** Comparación de concentraciones críticas en vegetación con MVT

Metal	Medio crítico	Época	Concentración máxima (mg/kg)	MVT (mg/kg)	Cumplimiento
Cadmio (Cd)	Río	Sequía	7.8	3.2	No cumple
Plomo (Pb)	Río	Lluvias	20063	90	No cumple
Plomo (Pb)	Laguna	Lluvias	35384	90	No cumple
Zinc (Zn)	Laguna	Sequía	12.1	259.2	Cumple

**Figura 6.** Comparación de concentraciones críticas en vegetación frente a los MVT



El cadmio en el río durante sequía superó el valor máximo tolerable, mientras que el plomo en lluvias excedió de manera extraordinaria el umbral referencial tanto en el río como en la laguna. El zinc se mantuvo por debajo del MVT. Estos resultados sugieren que la vegetación ribereña actúa como bioindicador sensible de contaminación metálica, especialmente bajo condiciones de mayor arrastre superficial y deposición de partículas durante la temporada lluviosa.

#### 4.8. Análisis Estadístico Comparativo entre Sequía y Lluvias

**Tabla 8.** Resultados de las Pruebas Estadísticas de Diferencia entre Épocas

Metal	Medio	Prueba Aplicada	Valor p	Diferencia Significativa ( $\alpha = 0.05$ )
Arsénico	Agua	t-Student	0.041	Sí
	Sedimentos	Mann-Whitney	0.028	Sí
	Vegetales	Mann-Whitney	0.003	Sí
Cadmio	Agua	t-Student	0.117	No
	Sedimentos	Mann-Whitney	0.049	Sí
Plomo	Sedimentos	Mann-Whitney	0.019	Sí
	Vegetales	Mann-Whitney	0.000	Sí
Zinc	Agua	t-Student	0.088	No

*Nota.* Los resultados mostraron que para arsénico, cadmio, plomo y zinc en sedimentos y vegetales las diferencias entre sequía y lluvias fueron estadísticamente significativas (valor  $p < 0.05$ ). Esto confirmó la hipótesis de que la variabilidad estacional afecta la movilidad y acumulación de metales en los distintos compartimentos ambientales.

#### 4.9. Cálculo de Coeficientes de Correlación entre Medios

**Tabla 9.** Coeficientes de Correlación entre Medios

Metal	Medios Comparados	Época	Coeficiente de Pearson/Spearman	Valor p	Significancia Estadística ( $\alpha = 0.05$ )
Arsénico	Agua-Sedimento	Sequía	0.721 (Pearson)	0.003	Sí
	Sedimento-Vegetal	Sequía	0.831 (Spearman)	0.001	Sí
	Agua-Sedimento	Lluvias	0.675 (Pearson)	0.007	Sí



Cadmio	Agua-Sedimento	Sequía	0.432 (Spearman)	0.092	No
	Sedimento-Vegetal	Lluvias	0.758 (Spearman)	0.004	Sí
Plomo	Sedimento-Vegetal	Sequía	0.913 (Spearman)	0.000	Sí
Zinc	Sedimento-Vegetal	Sequía	0.799 (Pearson)	0.002	Sí

*Nota.* Los resultados mostraron que arsénico, cadmio, plomo y zinc presentaron correlaciones significativas entre sedimentos y vegetales, lo que confirma la hipótesis de una posible transferencia y bioacumulación de estos metales en la vegetación del ecosistema.

## 5. Discusión

Los resultados evidencian una contaminación diferencial entre matrices ambientales, con mayor severidad en sedimentos y vegetación que en agua superficial, lo que confirma que la evaluación integrada de compartimentos permite interpretar con mayor precisión el impacto de la actividad minera en ecosistemas altoandinos. Desde una perspectiva hidrológica, la dinámica fluvial regula procesos de transporte, dilución, sedimentación y redistribución de contaminantes, especialmente bajo condiciones de variabilidad estacional (Amor Morales y Escudero Berian, 1983). En este contexto, la presencia de metales pesados en zonas de influencia minera es coherente con la movilización de materiales mineralizados, pasivos ambientales y actividades extractivas que favorecen su dispersión en el medio (Gutiérrez, 2014; Herrera Herbert, 2017).

En la matriz agua, el zinc (Zn) fue el elemento más crítico al superar el ECA-Agua en época seca, lo que sugiere concentración por menor caudal y reducción del efecto de dilución, un patrón reportado en cuencas intervenidas por actividades antrópicas y mineras (Astatkie et al., 2021; Dey et al., 2021; MINAM, 2017). En sedimentos, el arsénico (As) presentó las mayores concentraciones, confirmando que esta matriz actúa como sumidero



geoquímico de contaminación y refleja mejor la carga acumulativa del sistema (Pernía et al., 2018; Zhang et al., 2022). La mayor acumulación en época lluviosa sugiere una intensificación del arrastre superficial y de la deposición de partículas contaminadas.

La vegetación mostró la señal más crítica, con superación del MVT para Cd y concentraciones muy elevadas de Pb, lo que evidencia una marcada bioacumulación y un potencial riesgo de transferencia ecológica. Este comportamiento coincide con estudios que identifican a las plantas como bioindicadores sensibles en ambientes mineros y con capacidad de concentrar metales por absorción radicular y deposición atmosférica (Park & Chon, 2016; Xie et al., 2022). En conjunto, los hallazgos demuestran que la estacionalidad modula de manera distinta la distribución de metales según la matriz, por lo que el monitoreo ambiental en zonas mineras debe incluir no solo agua superficial, sino también sedimentos y biota vegetal, priorizando sectores críticos como el río Tambranco y la laguna Pucacocha (Thomas et al., 2022).

## 6. Conclusiones

Los resultados del estudio evidencian que la distribución de metales pesados en el área de influencia minera de Pueblo Nuevo–Lircay presenta un comportamiento diferenciado entre matrices ambientales y está significativamente influenciada por la estacionalidad. El arsénico mostró una variación consistente en agua, sedimentos y vegetación, mientras que el cadmio y el plomo evidenciaron diferencias significativas principalmente en sedimentos y vegetación, confirmando su tendencia a la acumulación en compartimentos sólidos y biológicos.

La matriz agua reflejó procesos de transporte inmediato y concentración estacional, destacando el zinc como el metal con mayores niveles durante la época seca, asociado a la reducción del caudal y la menor capacidad de dilución. En contraste, los sedimentos actuaron como sumidero geoquímico, con una marcada acumulación de arsénico y presencia significativa de cadmio y plomo, evidenciando procesos de deposición y almacenamiento histórico de contaminantes.



La vegetación ribereña constituyó el compartimento más sensible, registrando concentraciones elevadas de metales pesados, especialmente plomo y cadmio, lo que indica procesos de bioacumulación y potencial transferencia en la cadena trófica. Las concentraciones elevadas de plomo sugieren además la posible influencia de deposición atmosférica de partículas contaminadas, lo que resalta la complejidad de las vías de exposición.

El análisis estadístico confirmó que la estacionalidad modula la variación de los metales pesados, evidenciando diferencias significativas entre la estación lluviosa y la época seca para la mayoría de los casos evaluados, excepto para el zinc y el cadmio en la matriz agua, que no presentaron variaciones significativas.

En conjunto, los hallazgos resaltan la importancia de realizar evaluaciones multicompartimentales y multitemporales en zonas de influencia minera, ya que permiten una comprensión más integral de la dinámica de los metales pesados. Asimismo, los resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias de monitoreo ambiental continuo y gestión sostenible orientadas a mitigar los impactos de la actividad minera en ecosistemas altoandinos.

### **7. Declaración de contribución de autoría: CREdiT**

Andrés Zósimo Ñahui Gaspar: Responsable de la conceptualización, el diseño de la metodología y la ejecución de la investigación de campo. Johnnathan Ruber Vilcapoma-Juño: Encargado del análisis formal de los datos, la visualización de resultados y la redacción del borrador original. Demetrio Soto-Carbajal: Responsable de la supervisión técnica, la validación de los hallazgos y la revisión y edición crítica del manuscrito. Gabriel Ramírez Huincho: Encargado de la redacción de las conclusiones y la revisión de estilo final



## 8. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Huancavelica por el apoyo logístico y académico y al laboratorio por los análisis de muestras asimismo a los revisores por tomarse el tiempo y esfuerzo necesario para revisar este trabajo.

## 9. Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros o personales que pudieran influir en los resultados de este estudio.

## 10. Disponibilidad de los datos

Los datos están disponibles previa solicitud razonable a los autores correspondientes.



## Referencias

1. Amor Morales & A. Escudero Berian. (1983). EL RIO. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/23699/1/TEMASMONOGRAFICOS8.pdf>.
2. Astatkie, H., Ambelu, A., & Beyene, E. M. (2021). Sources and level of heavy metal contamination in the water of Awetu watershed streams, southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 7(3), e06385. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06385>
3. Dey, M., Akter, A., Islam, S., Chandra Dey, S., Choudhury, T. R., Fatema, K. J., & Begum, B. A. (2021). Assessment of contamination level, pollution risk and source apportionment of heavy metals in the Halda River water, Bangladesh. *Heliyon*, 7(12), e08625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08625>
4. Gutiérrez, I. (2014). Breve reseña de la concesión minera de exploración y explotación desde el punto de vista legal. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 17(34), Article 34. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v17i34.11386>
5. Herrera Herbert, J. (2017). *Introducción a la Minería. Vol. I: Conceptos, tecnologías y procesos* (2.a ed.). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.63396>
6. Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Estándares de Calidad Ambiental para Agua*. D.S. N.º 004-2017-MINAM.
7. Palomino Oré, S. B. (2012). *Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Aguascocha* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/3349>
8. Park, J., & Chon, H. (2016). Characterization of cadmium biosorption by *Exiguobacterium* sp. Isolated from farmland soil near Cu-Pb-Zn mine | *Environmental Science and Pollution Research*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-6335-8>
9. Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., Zambrano, J., Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., & Zambrano, J. (2018). Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 89-105. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.246>
10. Pineda-Caro, D. Y., Medina-Vargas, Ó. J., & Falla-Rocha, G. (2021). Enseñanza del concepto de pH desde la perspectiva del pensamiento científico: Una revisión sistemática exploratoria. *Pensamiento y Acción*, 30, Article 30. <https://doi.org/10.19053/01201190.n30.2021.12129>
11. Shahzadi, I., Khan, Z. H., Akram, W., Khan, W. U., Ahmad, A., Yasin, N. A., & Yujie, L. (2022). Heavy metal and organic pollutants removal from water using bilayered polydopamine composite of sandwiched graphene Nanosheets: One solution for two obstacles. *Separation and Purification Technology*, 280, 119711. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119711>



12. Thomas, B., Vinka, C., Pawan, L., & David, S. (2022). Sustainable groundwater treatment technologies for underserved rural communities in emerging economies. *Science of The Total Environment*, 813, 152633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152633>
13. Thomas, Craver, Labhasetwar, & David. (2022). Tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas subterráneas para comunidades rurales desatendidas en economías emergentes—ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721077111>
14. Zhang, Z., Yu, N., Liu, D., & Zhang, Y. (2022). Assessment and source analysis of heavy metal contamination in water and surface sediment in Dongping Lake, China. *Chemosphere*, 307, 136016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136016>
15. Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*, 13(19), 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
16. Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
17. Custodio, M., Pizarro, S., Huarcaya, J., Ortega, K., & Ccopi, D. (2025). Ecological and human health risk assessment of heavy metals in mining-affected river sediments in the Peruvian Central Highlands. *Toxics*, 13(9), 783. <https://doi.org/10.3390/toxics13090783>
18. Fadlillah, L. N., Utami, S., Rachmawati, A. A., Jayanto, G. D., & Widyastuti, M. (2023). Ecological risk and source identifications of heavy metals contamination in the water and surface sediments from anthropogenic impacts of urban river, Indonesia. *Heliyon*, 9(4), e15485. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15485>
19. Guan, X., Huang, H., Ke, X., Cheng, X., Zhang, H., Chen, A., Qiu, G., Wu, H., & Wei, C. (2025). Monitoring, modeling, and forecasting long-term changes in coastal seawater quality due to climate change. *Nature Communications*, 16, Artículo 57913. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57913-4>
20. Hatje, V., Sarin, M., Sander, S. G., Omanović, D., Ramachandran, P., Völker, C., Barra, R. O., & Tagliabue, A. (2022). Emergent interactive effects of climate change and contaminants in coastal and ocean ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 9, 936109. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.936109>
21. Mohammad, S. J., Ling, Y. E., Halim, K. A., Sani, B. S., & Abdullahi, N. I. (2025). Heavy metal pollution and transformation in soil: A comprehensive review of natural bioremediation strategies. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11, 528–544. <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00241-6>
22. Nawrot, N., Wojciechowska, E., Mohsin, M., Kuittinen, S., Pappinen, A., & Rezanía, S. (2021). Trace metal contamination of bottom sediments: A review of



- assessment measures and geochemical background determination methods. *Minerals*, 11(8), 872. <https://doi.org/10.3390/min11080872>
23. Paltseva, A. A., & Neaman, A. (2020). An emerging frontier: Metal(loid) soil pollution threat under global climate change. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(11), 2097-2099. <https://doi.org/10.1002/etc.4790>
24. Robledo Ardila, P. A., Álvarez Alonso, R., Durán Valsero, J. J., Morales García, R., Árcega Cabrera, F., Lamas Cosío, E., & Durán Laforet, S. (2023). Assessment of heavy metal pollution in marine sediments from southwest of Mallorca island, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 16852–16866. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25014-0>
25. Sanad, H., Moussadek, R., Mouhir, L., Oueld Lhaj, M., Dakak, H., & Zouahri, A. (2025). Geospatial analysis of trace metal pollution and ecological risks in river sediments from agrochemical sources in Morocco's Sebou basin. *Scientific Reports*, 15, 16701. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01199-5>
26. Tian, K., Wu, Q., Liu, P., Hu, W., Huang, B., Shi, B., Zhou, Y., Kwon, B.-O., Choi, K., Ryu, J., Khim, J. S., & Wang, T. (2020). Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and water from the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Environment International*, 136, 105512. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105512>
27. Timothy, N., & Williams, E. T. (2019). Environmental pollution by heavy metal: An overview. *International Journal of Environmental Chemistry*, 3(2), 72-82. <https://doi.org/10.11648/j.ijec.20190302.14>
28. Zhang, P., Yang, M., Lan, J., Huang, Y., Zhang, J., Huang, S., Yang, Y., & Ru, J. (2023). Water quality degradation due to heavy metal contamination: Health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. *Toxics*, 11(10), 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>
29. Zhang, Y., Shen, Z., Zhou, W., Liu, C., Li, Y., Ding, B., Zhang, P., Zhang, X., & Zhang, Z. (2024). Environmental problems of emerging toxic metals and treatment technology and methods. *RSC Advances*, 14, 37299-37318. <https://doi.org/10.1039/d4ra06085g>

