



Presencia de metales pesados en suelos del cauce del río Ica en temporada seca

Presence of heavy metals in soils of the Ica River bed during the dry season

Presença de metais pesados nos solos do leito do rio Ica na estação seca

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil

o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.358>

Valeria Zender Peña
valeria_20_1999@hotmail.com

Isis Cristel Córdova Barrios
isis.cordova@unica.edu.pe

Josefa Bertha Pari Olarte
bertha.pari@unica.edu.pe

Eddie Loyola Gonzales
eddie.loyola@unica.edu.pe

Donato Efraín Ambia Pereyra
dambia@unica.edu.pe

Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú

Artículo recibido: 10 de marzo 2025 / Arbitrado: 11 de abril 2025 / Publicado: 1 de mayo 2025

RESUMEN

La contaminación por metales pesados en el lecho de los ríos es grave por su toxicidad, persistencia y bioacumulación, afectando ecosistemas, salud humana y provocando daños irreversibles. Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación fue determinar el nivel de contaminación del suelo causado por la presencia de residuos no deseados localizados en el cauce del río Ica durante la estación seca. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo, de tipo observacional, prospectivo y de corte transversal. Se realizaron monitoreos de suelos en cuatro puntos designados (P-01, P-02, P-03, P-04). Se colectaron muestras de un área de 23 metros de ancho por 30 metros de largo en cada punto de muestreo. Los metales pesados analizados registraron concentraciones promedio significativamente inferiores a los límites regulatorios. El arsénico presentó un promedio de 2.235 mg/kg, lo que equivale al 1.6% del estándar permitido (140 mg/kg). El bario alcanzó 160.075 mg/kg, apenas el 8% de su límite (2000 mg/kg). Por otro lado, el plomo mostró un promedio de 226.125 mg/kg (28.3% del umbral de 800 mg/kg). Finalmente, el cromo se mantuvo en 3.895 mg/kg (0.39% del estándar de 1000 mg/kg). Los análisis de metales pesados revelaron concentraciones detectables de arsénico, bario, plomo y cromo, las cuales, en su mayoría, no superaron los límites del Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Estos resultados indicaron una presencia controlada de los contaminantes, sin riesgos inmediatos.

Palabras clave: Contaminación de suelos; Residuos no deseados; Metales pesados; Salud humana; Educación ambiental

ABSTRACT

Heavy metal pollution in riverbeds is serious due to its toxicity, persistence, and bioaccumulation, affecting ecosystems, human health, and causing irreversible damage. Therefore, the objective of this research was to determine the level of soil contamination caused by the presence of unwanted waste located in the Ica River bed during the dry season. The research was conducted using a quantitative approach, with a descriptive scope, observational, prospective, and cross-sectional design. Soil monitoring was carried out at four designated points (P-01, P-02, P-03, P-04). Samples were collected from an area of 23 meters wide by 30 meters long at each sampling point. The analyzed heavy metals recorded average concentrations significantly below regulatory limits. Arsenic showed an average of 2.235 mg/kg, equivalent to 1.6% of the permitted standard (140 mg/kg). Barium reached 160.075 mg/kg, only 8% of its limit (2000 mg/kg). Lead averaged 226.125 mg/kg (28.3% of the 800 mg/kg threshold). Finally, chromium remained at 3.895 mg/kg (0.39% of the 1000 mg/kg standard). Heavy metal analyses revealed detectable concentrations of arsenic, barium, lead, and chromium, most of which did not exceed the Environmental Quality Standard (EQS) limits. These results indicated a controlled presence of pollutants, with no immediate risks.

Key words: Soil contamination; Unwanted waste; Heavy metals; Human health; Environmental education

RESUMO

A contaminação por metais pesados no leito dos rios é grave devido à sua toxicidade, persistência e bioacumulação, afetando ecossistemas, saúde humana e causando danos irreversíveis. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi determinar o nível de contaminação do solo causado pela presença de resíduos indesejados localizados no leito do rio Ica durante a estação seca. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma abordagem quantitativa, de escopo descritivo, observacional, prospectivo e de corte transversal. Foram realizados monitoramentos do solo em quatro pontos designados (P-01, P-02, P-03, P-04). Amostras foram coletadas em uma área de 23 metros de largura por 30 metros de comprimento em cada ponto de amostragem. Os metais pesados analisados registraram concentrações médias significativamente inferiores aos limites regulatórios. O arsênico apresentou uma média de 2,235 mg/kg, equivalente a 1,6% do padrão permitido (140 mg/kg). O bário atingiu 160,075 mg/kg, apenas 8% do seu limite (2000 mg/kg). O chumbo mostrou uma média de 226,125 mg/kg (28,3% do limite de 800 mg/kg). Finalmente, o cromo manteve-se em 3,895 mg/kg (0,39% do padrão de 1000 mg/kg). As análises de metais pesados revelaram concentrações detectáveis de arsênico, bário, chumbo e cromo, as quais, em sua maioria, não excederam os limites do Padrão de Qualidade Ambiental (PQA). Esses resultados indicaram uma presença controlada de contaminantes, sem riscos imediatos.

Palavras-chave: Contaminação do solo, Resíduos indesejados; Metais pesados; saúde humana; Educação ambiental

INTRODUCCIÓN

En el siglo XXI, los desafíos ambientales demandan respuestas científicas integrales frente a la degradación de ecosistemas y sus impactos en la salud humana (1). La contaminación del suelo emerge como un problema crítico que compromete la seguridad alimentaria, el equilibrio ecológico y el bienestar poblacional, especialmente en regiones semiáridas como Ica, donde los períodos secos exacerbaban la presión sobre los recursos naturales (2). La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte sobre los riesgos asociados a la exposición de contaminantes edáficos, particularmente en zonas urbanas y periurbanas con acumulación de residuos sólidos (3). Este escenario adquiere mayor relevancia en el cauce del río Ica, eje estratégico para la agricultura y dinámica socioeconómica regional, actualmente afectado por vertimientos incontrolados que degradan su calidad ambiental (4).

En este sentido, la presencia de metales pesados en suelos de cauces fluviales es un fenómeno global con causas naturales y antropogénicas. Actividades como la minería, vertidos industriales, uso de agroquímicos y descargas de aguas residuales urbanas son las principales fuentes humanas, mientras que la erosión de rocas ricas en metales y eventos volcánicos contribuyen naturalmente. Diferentes estudios destacan concentraciones alarmantes de cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), vinculadas

a prácticas agrícolas intensivas y gestión deficiente de residuos. Estos metales se acumulan en suelos debido a factores como pH ácido, baja materia orgánica y textura franco-arenosa, incrementando su biodisponibilidad para cultivos como hortalizas, lo que representa riesgos para la seguridad alimentaria y la salud humana por bioacumulación en la cadena trófica (5,6).

En esta dirección, estudios globales evidencian la correlación entre disposición inadecuada de residuos y contaminación edáfica. En vertederos de Nigeria, las concentraciones de arsénico, plomo y zinc superaron 15 veces los niveles de referencia, bioacumulándose en plantas circundantes (7). Análisis en Etiopía detectaron pH alcalino (>8) y excesos de cadmio (2.4 mg/kg) y cobre (156 mg/kg) en suelos adyacentes a un vertedero, rebasando estándares nacionales (8). Investigaciones en Vietnam utilizando normas de la OMS identificaron contaminación difusa por metales pesados vinculada a residuos orgánicos e inorgánicos (9). Estos hallazgos resaltan la urgencia de evaluar sistemáticamente los impactos de los depósitos informales, particularmente en ecosistemas fluviales vulnerables.

En relación a los impactos socioambientales de esta contaminación son multidimensionales. En la agricultura, metales como Cd y Pb inhiben el crecimiento vegetal, reducen rendimientos y degradan la calidad del suelo, amenazando economías locales dependientes de cultivos. Para

la salud humana, la exposición crónica a estos contaminantes —mediante consumo de alimentos o contacto dérmico— se asocia a enfermedades renales, cáncer y daños neurológicos, especialmente en niños. Zonas con estrés hídrico, como cuencas áridas, son más vulnerables debido a la escasez de agua para diluir contaminantes. Además, la movilidad de metales en suelos fluviales contamina aguas subterráneas, exacerbando crisis sanitarias en comunidades sin acceso a sistemas de tratamiento, como reportado en regiones de África Subsahariana y Sudamérica (10,11).

Asimismo, en Colombia, Pérez (12), en el 2021, evaluó la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas de la ribera del río Bogotá, analizando municipios como Sibaté, Tenjo y Bosa. Mediante espectrofotometría de absorción atómica, se midieron concentraciones de cromo (Cr), cadmio (Cd), plomo (Pb) y níquel (Ni), determinando que los suelos presentan contaminación moderada a extrema según el índice de geoacumulación. Destacan niveles elevados de Cr en todas las zonas muestreadas, mientras que Sibaté registró las mayores concentraciones de Pb (hasta 505.2 mg/kg) y Cd, superando estándares ambientales. Estos metales, vinculados a vertimientos industriales, aguas residuales para riego y actividades como curtidurías y galvanizado, incrementan su biodisponibilidad debido al pH ácido y baja materia orgánica del suelo.

En Perú, la generación per cápita de 0.5 kg diarios de residuos y su manejo inadecuado en el 50% de los casos agravan la degradación de suelos (13). El río Ica enfrenta presión antropogénica por desechos domésticos e industriales que, durante la estación seca, generan lixiviados con metales pesados. Muestreos en puentes críticos (Socorro, Puno, Grau y Cutervo) revelaron acumulación de residuos con potencial toxicidad (14). Este contexto exige evaluar los mecanismos de movilidad y persistencia de contaminantes, considerando factores como pH, textura del suelo y condiciones climáticas que modulan su biodisponibilidad (15).

Otra investigación sobre la contaminación por metales pesados en la microcuenca del río Huancaray en Perú Correa et al., (5), en el 2021, revelaron la presencia de cadmio, plomo, arsénico y mercurio en el agua, suelo y sedimentos, superando en algunos casos los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental peruana. Las concentraciones más altas se encontraron en las zonas agrícolas y urbanas, lo que sugiere una relación directa con las actividades antropogénicas como la agricultura intensiva, la minería y la descarga de aguas residuales. El cadmio y el arsénico fueron los metales que presentaron mayor riesgo para la salud humana y el ecosistema acuático.

Por otra parte, la subcuenca Llallimayo (Puno) revela niveles alarmantes de contaminación, particularmente por Pb y arsénico (As). Se registraron concentraciones de hasta 505.2 mg/kg de Pb y 40.19 mg/kg de As, atribuidas principalmente a la cercanía de actividades mineras y a la descarga de residuos en la laguna de oxidación de la zona. Además, se identificó Cd en niveles preocupantes, aunque menores en comparación. Estos metales, de alta persistencia y toxicidad, representan un riesgo para la salud humana y la sostenibilidad agrícola, ya que pueden acumularse en cultivos como *Solanum tuberosum* (papa) e ingresar a la cadena alimenticia. El estudio también destaca la influencia del pH ácido y la baja materia orgánica en el suelo, factores que incrementan la movilidad y biodisponibilidad de estos contaminantes (16).

Asimismo, el diagnóstico por metales pesados en la microcuenca del río Alto Huallaga (Perú) y sus suelos agrícolas, identificó la presencia de Cd, Pb y cobre (Cu) en aguas y suelos. En el agua, se registraron concentraciones de hasta 0.07 mg/L de Pb y 2.7 mg/L de Cu, mientras que en los suelos ribereños se detectaron niveles de hasta 0.9 mg/kg de Pb y 2.5 mg/kg de Cu, con pH neutro (7.8–7.92) que favorece la movilidad de estos metales. La principal fuente de contaminación son los relaves mineros vertidos al río, que afectan la agricultura de la zona, especialmente en tramos como Pallanchacra y Churubamba. Aunque las

concentraciones no superan en todos los casos los límites permisivos, representan un riesgo acumulativo para los cultivos y la salud humana, dada su persistencia y toxicidad. Los autores destacan la necesidad de monitoreo continuo y estrategias de remediación para mitigar impactos socioambientales en una región dependiente de la agricultura (17).

También, Quispe et al., (18), en el 2019, analizaron la presencia de metales pesados en sedimentos superficiales del río Coata, afluente del lago Titicaca en Perú, durante épocas de avenida y estiaje en 2017. Los resultados revelaron concentraciones de Cr: 4.10–28.42 mg/kg, Cd: 0.10–0.70 mg/kg y Pb: 3.75–16.50 mg/kg. La contaminación se atribuyó principalmente a actividades antropogénicas, como vertidos de aguas residuales urbanas e industriales de Juliaca, que afectan la calidad del agua y los sedimentos. Aunque el Cd y Pb no excedieron los límites en todas las muestras, su persistencia y movilidad —favorecida por el pH neutro y la baja materia orgánica— representan riesgos acumulativos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, especialmente por bioacumulación en la cadena trófica.

Además, González y Murga (19), en el 2020, evaluaron la contaminación por metales pesados en ríos y truchas *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) en Pasco, Perú, región afectada por actividades mineras. Los resultados revelaron

concentraciones elevadas de Pb, Cd y As en aguas y tejidos de los peces. En agua, el Cd alcanzó hasta 0.15 mg/L, mientras en truchas se detectaron acumulaciones significativas en hígado y músculo (Pb: 1.8 mg/kg; Cd: 0.25 mg/kg), evidenciando bioacumulación. La contaminación se atribuyó a residuos mineros, relaves y drenajes ácidos que afectan los ríos, agravada por el pH ácido del agua, que incrementa la biodisponibilidad de los metales. Estos niveles representan un riesgo toxicológico para poblaciones locales que consumen truchas, con posibles efectos crónicos por exposición prolongada.

Teóricamente, el suelo constituye un sistema dinámico donde interactúan minerales, materia orgánica y microorganismos, susceptible a alteraciones por contaminantes (20). Su evaluación integra muestreo estratificado, espectrometría de masas y modelos geoestadísticos para mapear riesgos (21). Los metales pesados destacan por su persistencia y capacidad de bioacumulación, requiriendo monitoreos periódicos que consideren umbrales ecotoxicológicos (22). En Ica, la aridez extrema y la reducción del caudal fluvial durante sequías intensifican la concentración de contaminantes, amplificando su impacto en la biodiversidad y salud pública (23).

En este sentido, la presente investigación contribuye al conocimiento científico mediante una evaluación integral de contaminantes prioritarios en un ecosistema fluvial árido, proporcionando

protocolos replicables para monitoreos en contextos similares. Los hallazgos sustentan la urgencia de optimizar la gestión de residuos urbanos e industrializar el reciclaje, estrategias clave para alcanzar metas de sostenibilidad en regiones con estrés hídrico (6).

Asimismo, la investigación integra análisis fisicoquímicos y herramientas geoespaciales para cuantificar la distribución espacial de Pb, As, Ba y Cr, contrastando sus concentraciones con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos y los límites de la OMS (5). Los resultados aportarán una línea base para el diseño de políticas de mitigación alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 3, 6 y 15, fortaleciendo la gestión ambiental local ante el cambio climático y la degradación de ecosistemas (17).

Por tanto, el objetivo de este estudio es determinar el nivel de contaminación del suelo causado por la presencia de residuos no deseados localizados en el cauce del Río Ica durante la estación seca.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo, de tipo observacional, prospectivo y de corte transversal, en la ciudad de Ica, ubicada en el centro-sur del Perú y capital del departamento homónimo. Este departamento, creado el 30 de enero de 1866, se sitúa en la región

centro-occidental del país, limitando con Lima, Huancavelica, Ayacucho, Arequipa y el océano Pacífico. Con una superficie de 21,327 km², forma parte del desierto costero peruano, conocido como el Gran Tablazo de Ica. La ciudad comprende cinco distritos urbanos y supera los 300,000 habitantes, destacando actualmente por su producción agroexportadora en el fértil valle del río Ica, entre el desierto y la cordillera de los Andes.

La población objeto de investigación está conformada por los suelos ubicados en el cauce del río Ica, específicamente en los sectores considerados críticos durante la temporada seca. Estos suelos representan el objeto directo de análisis, ya que en ellos se concentra la acumulación de residuos sólidos y sustancias contaminantes debido a la disminución del caudal

y al uso inadecuado del lecho fluvial como área de disposición informal de desechos. Al tratarse de un estudio enfocado en la detección de metales pesados, los suelos del cauce constituyen la unidad ambiental que refleja de forma representativa el impacto de estas actividades antrópicas.

Por otro lado, la metodología combinó muestreo sistemático en 20 puntos del cauce seco con análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica. Se tomaron muestras de suelos cuatro puntos designados (P-01, P-02, P-03, P-04) a lo largo del río Ica durante la estación seca. Las muestras compuestas se recolectaron in situ, abarcando un área de estudio de 23 metros de ancho por 30 metros de largo en cada punto de muestreo. Las coordenadas UTM y la ubicación exacta se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción y ubicación en coordenadas UTM de los puntos de muestreo.

Estaciones de Monitoreo	Coordinantes UTM (WGS zona 18L)		Descripción
	Este	Norte	
P-01	421823	8445283	Altura de la Calle Cerro Azul
P-02			Rio Ica, Intersección Con El Puente Grau
P-03	421826	8445286	Altura De La Calle Cajamarca
P-04			Altura De La Calle Dos De Mayo

*Coordenadas UTM en el WGS-84, zona 18L A&B Consulting Group Peru E.I.R.L.

Para la recolección de datos en el lecho del río Ica durante la estación seca, se emplearon instrumentos in-situ que permitieron una evaluación precisa de las condiciones del suelo. Se utilizó un muestreado de pistón para extraer

muestras a profundidades de 0 - 30 cm en cuatro ubicaciones representativas, complementado con una balanza analítica para el pesaje de las muestras. La temperatura del suelo se midió con un termómetro específico para ambientes

terrestres, asegurando la inserción adecuada y estabilización de la lectura a pocos centímetros de profundidad. Para determinar el pH, se utilizó un medidor previamente calibrado, sumergido en una suspensión de suelo y agua destilada,

con limpieza del electrodo entre cada medición. Cada dato recolectado fue registrado junto con la hora, ubicación y profundidad, proporcionando información contextual relevante sobre las condiciones térmicas y químicas del suelo.



Figura 1. Muestra obtenida en el lugar designado. Monitoreo de la Temperatura y pH.

Los métodos de procesamiento de datos, empleadas en esta investigación sobre la contaminación del suelo y los metales pesados, incluyeron como primer paso, la realización de una inspección de la zona. Posteriormente, se procedió a la recolección de muestras de suelo, utilizando técnicas estandarizadas para evitar posibles contaminaciones externas y garantizar la representatividad de las muestras en relación con las concentraciones de metales pesados. Las muestras fueron enviadas a un laboratorio acreditado, como Envirotest, que aplicó procedimientos de análisis químicos avanzados para medir las concentraciones de metales como arsénico, bario, plomo y cromo. Este enfoque garantizó la fiabilidad de los datos obtenidos, permitiendo una evaluación precisa de la calidad

del suelo en la región. Los datos se interpretaron mediante índices de geoacumulación y factores de contaminación, contrastados con ECA-Perú (DS 011-2017-MINAM) (24).

Seguidamente, los análisis e interpretación de datos obtenidos se organizaron de forma sistemáticamente mediante el uso del estadístico t-student, facilitando el análisis y garantizando la validez de los resultados en el estudio. Fue empleado para este caso el software R versión 4.5.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los puntos P-01 a P-04 en el lecho del río durante la temporada seca evidenció un comportamiento ambiental homogéneo y estable. Los valores de pH oscilaron entre 7.4 y 7.5,

manteniendo un ligero carácter alcalino típico de sistemas semiáridos, donde la escasa precipitación y la alta evaporación favorecen la acumulación de minerales básicos. Por otro lado, la temperatura registró un rango estrecho (18.5-18.6°C), reflejando oscilaciones mínimas atribuibles a la baja humedad y la radiación solar constante propias de la época seca. Estos parámetros, coherentes con el contexto semiárido de la región, sugieren un equilibrio temporal en las condiciones fisicoquímicas del sustrato fluvial, ausente de perturbaciones agudas. Esta estabilidad, aunque favorable, resalta la fragilidad del ecosistema ante cambios estacionales o actividades antrópicas, reforzando la necesidad de monitorear tendencias a largo plazo para anticipar impactos en la calidad del suelo y agua asociada.

En relación con el arsénico, las concentraciones registradas en los puntos P-01 a P-04 oscilaron entre 2.21 y 2.27 mg/kg, valores que representan menos del 2% del límite máximo permitido (140 mg/kg). Esta baja presencia sugiere una influencia mínima de actividades antropogénicas, como minería o agricultura intensiva, en el área estudiada. No obstante, debido a su potencial carcinogénico, se recomienda mantener un monitoreo periódico para evitar posibles procesos de bioacumulación en cultivos o cuerpos de agua cercanos, incluso en concentraciones consideradas seguras.

Por otro lado, el bario mostró niveles entre 157.6 y 162.4 mg/kg, equivalentes al 8% del estándar regulatorio (2000 mg/kg) (2). Su baja movilidad en suelos alcalinos (pH 7.4-7.5) y su origen geogénico explican estas concentraciones no riesgosas. Sin embargo, su persistencia en el suelo exige evaluar su interacción con otros contaminantes en escenarios de estrés hídrico prolongado, especialmente en regiones semiáridas donde la disponibilidad de agua es limitada.

En cuanto al cadmio, los valores registrados fueron inferiores al límite de detección (<0.29 mg/kg), ubicándose muy por debajo del umbral ECA establecido (22 mg/kg). Esta ausencia significativa indica que no existen fuentes activas de contaminación por este metal en la zona. Aun así, dada su toxicidad para los ecosistemas, se sugiere mantener protocolos de vigilancia para detectar cambios abruptos en futuros monitoreos.

Respecto al plomo, se detectaron concentraciones entre 221.8 y 231.7 mg/kg, alcanzando hasta el 29% del límite ECA (800 mg/kg) (3). Su proximidad relativa al umbral regulatorio señala posibles aportes de fuentes urbanas o agrícolas, como el uso de fertilizantes contaminados. Dada su neurotoxicidad, se recomienda ampliar el monitoreo a zonas agrícolas aledañas para evaluar su bioaccesibilidad en cultivos y garantizar la seguridad alimentaria.

En contraste, el cromo presentó valores entre 3.87 y 3.91 mg/kg, menos del 0.4% del estándar (1000 mg/kg) (4). Su mínima concentración, asociada a su forma trivalente (esencial en trazas), descarta riesgos ecotoxicológicos inmediatos. Sin embargo, futuros estudios deben analizar su especiación química para descartar la presencia de cromo hexavalente, una variante altamente tóxica y móvil en medios acuáticos.

Asimismo, el mercurio registró niveles inferiores al límite de detección (<0.04 mg/kg), muy por debajo del máximo permitido (24 mg/kg). Su ausencia refleja la falta de fuentes industriales o mineras relevantes en el área. Pese a esto, su alta toxicidad incluso en trazas justifica la inclusión de análisis específicos en futuras evaluaciones, especialmente en zonas con actividad humana creciente.

Tabla 2. Resultado del monitoreo de la calidad de suelo, punto (P-01, P-02, P-03 y P-04).

Parámetros	Unidad	Profundidad	Resultados				Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM (24)
			Código: P-01	Código: P-02	Código: P-03	Código: P-04	
pH	Und. pH	---	7.5	7.4	7.4	7.4	---
Temperatura	°C	---	18.5	18.6	18.6	18.6	---
Metales							
Arsénico			2.25	2.21	2.27	2.23	140
Bario			160.5	157.6	162.4	159.8	2000
Cadmio	mg/kg	30 cm	< 0.029	< 0.024	< 0.025	< 0.023	22
Plomo			221.8	223.9	231.7	227.1	800
Cromo			3.91	3.87	3.91	3.89	1000
Mercurio			< 0.04	< 0.03	< 0.03	< 0.025	24

Los metales pesados analizados en el lecho del Río Ica durante la estación seca registraron concentraciones promedio significativamente inferiores a los límites regulatorios. El arsénico presentó un promedio de 2.235 mg/kg, lo que equivale al 1.6% del estándar permitido (140 mg/kg), con una diferencia estadística altamente significativa ($t=-14389$; $p=7.402e-13$). El bario alcanzó 160.075 mg/kg, apenas el 8% de su límite

(2000 mg/kg), respaldado por valores de t y p concluyentes ($t=-1856.4$; $p=3.447e-10$). Por otro lado, el plomo mostró un promedio de 226.125 mg/kg (28.3% del umbral de 800 mg/kg), con una significancia estadística robusta ($t=-266.4$; $p=1.166e-07$). Finalmente, el cromo se mantuvo en 3.895 mg/kg (0.39% del estándar de 1000 mg/kg), destacando una discrepancia extrema ($t=-104040$; $p=1.958e-15$).

En consecuencia, estos resultados confirman que, en condiciones de estiaje, las concentraciones de metales no representan un riesgo inmediato para el ecosistema. No obstante, el plomo, al aproximarse al 30% del límite, sugiere una posible influencia de actividades humanas, lo que exige monitoreo continuo para prevenir bioacumulación. Los valores ínfimos de p

($<<0.001$) validan la confiabilidad de los datos y la homogeneidad ambiental en la zona. Aunque los niveles actuales son seguros, la aridez del entorno podría intensificar la retención de contaminantes a largo plazo. Se recomienda ampliar los estudios a periodos húmedos y evaluar fuentes antropogénicas para asegurar la protección integral del río.

Tabla 3. Promedio de metales pesados en lecho del Río Ica durante la estación seca.

Metal	Promedio mg/kg	Promedio estándar mg/kg	t	p
Arsénico	2.235	140	-14389	7.402e-13
Bario	160.075	2000	-1856.4	3.447e-10
Plomo	226.125	800	-266.4	1.166e-07
Cromo	3.895	1000	-104040	1.958e-15

Discusión

Los resultados de esta investigación mostraron que las concentraciones de metales pesados en los suelos del cauce del Río Ica durante la estación seca se mantuvieron por debajo de los límites establecidos por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) peruano. Esta tendencia contrasta con hallazgos reportados en otras regiones con condiciones socioambientales similares. Por ejemplo, en vertederos de Nigeria, las concentraciones de plomo y arsénico superaron hasta 15 veces los niveles de referencia, asociados a una gestión deficiente de residuos y actividades mineras no reguladas (7). En contraste, el plomo en el Río Ica alcanzó solo el 29% del límite ECA (800 mg/

kg), lo que sugiere que las fuentes antropogénicas locales, como desechos urbanos o agrícolas, no ejercen una presión crítica en la zona estudiada. Esta discrepancia podría atribuirse a diferencias en las prácticas de manejo de residuos y a la menor industrialización en el contexto peruano (13).

En este sentido, el arsénico, con un promedio de 2.235 mg/kg (1.6% del ECA), mostró una presencia mínima, a diferencia de estudios en Etiopía, donde niveles de cadmio (2.4 mg/kg) y cobre (156 mg/kg) excedieron los estándares nacionales (8). La baja movilidad del arsénico en suelos alcalinos (pH 7.4–7.5), característicos de ambientes áridos, podría limitar su biodisponibilidad, reduciendo riesgos de bioacumulación en cultivos (15). No obstante,

su potencial carcinogénico exige vigilancia continua, tal como recomienda la OMS para áreas con exposición crónica (3). Estos resultados coinciden con investigaciones en Vietnam, donde la contaminación por metales se vinculó a residuos orgánicos, pero no alcanzó umbrales críticos debido a mecanismos naturales de atenuación (9).

En relación al bario, con concentraciones de 160.075 mg/kg (8% del ECA), mostró un origen predominantemente geogénico, coherente con su baja movilidad en suelos alcalinos. Este patrón difiere de hallazgos en Laos, donde metales como el plomo en suelos de vertederos urbanos superaron los 300 mg/kg, vinculados a lixiviados de basura no tratada [11]. La estabilidad fisicoquímica observada en el río Ica, con temperaturas entre 18.5–18.6°C y pH homogéneo, podría favorecer la retención de contaminantes, limitando su dispersión. Sin embargo, la aridez extrema de la región, como señala el Banco Mundial (4), podría intensificar la acumulación a largo plazo, requiriendo monitoreos estacionales para evaluar tendencias (23).

Aunque el plomo no superó los límites regulatorios, su concentración relativa (226.125 mg/kg) fue la más cercana al umbral ECA. Esto coincide parcialmente con estudios en Ekiti (Nigeria), donde actividades agrícolas con fertilizantes contaminados contribuyeron a elevaciones moderadas de plomo en suelos (8).

En el río Ica, la proximidad a zonas urbanas y agrícolas sugiere posibles fuentes difusas, como emisiones vehiculares o escorrentías de cultivos. Este hallazgo resalta la necesidad de implementar estrategias de remediación temprana, tal como proponen Zhang et al., (25) para áreas con estrés hídrico, donde la escasez de lluvias limita la dilución de contaminantes.

Por otra parte, el cromo, con un promedio de 3.895 mg/kg (0.39% del ECA), mostró niveles insignificantes, probablemente en su forma trivalente (Cr-III), esencial en trazas. Esto contrasta con hallazgos en la República Checa, donde su forma hexavalente (Cr-VI), altamente tóxica, predominó en suelos cercanos a industrias (15). La ausencia de fuentes industriales en el río Ica explica esta diferencia, aunque futuros estudios deben analizar la especiación química para descartar riesgos. Similarmente, el mercurio (<0.04 mg/kg) y el cadmio (<0.29 mg/kg) estuvieron por debajo de los límites de detección, a diferencia de regiones mineras como Vientiane (Laos), donde el mercurio alcanzó 0.8 mg/kg debido a la extracción aurífera (14).

En cuanto, la homogeneidad en los parámetros fisicoquímicos (pH y temperatura) sugiere un equilibrio temporal en el ecosistema, aunque frágil ante cambios climáticos o actividades humanas. Esta estabilidad coincide con observaciones en suelos semiáridos de Marruecos,

donde la baja humedad limitó la movilidad de metales. No obstante, la falta de datos en temporadas húmedas representa una limitación, ya que las lluvias podrían movilizar contaminantes acumulados, como se ha documentado en el río Amarillo (China) (25). Ampliar el monitoreo a ciclos hidrológicos completos permitiría una evaluación integral de los riesgos.

Asimismo, los análisis estadísticos, con valores de *t* student entre -14389 (arsénico) y -266.4 (plomo), respaldaron la significancia de las diferencias entre las concentraciones observadas y los límites ECA. Esto refuerza la confiabilidad metodológica, alineada con protocolos estandarizados como los descritos por la FAO (21). Sin embargo, la escasez de estudios locales sobre bioaccesibilidad de metales en cultivos limita la comprensión de riesgos para la salud humana. Investigaciones en India han demostrado que incluso concentraciones subcríticas de arsénico pueden bioacumularse en arroz, afectando la seguridad alimentaria (1). Por ello, se recomienda integrar análisis biológicos en futuros trabajos.

Además, aunque los niveles actuales de metales no representan un peligro inmediato, su presencia indica la necesidad de fortalecer la gestión ambiental. Esto incluye optimizar el manejo de residuos urbanos, promover el reciclaje

industrial y educar a la población, estrategias alineadas con los ODS 3 y 6 (26). Estudios en Perú han destacado que el 50% de los residuos se gestionan inadecuadamente (13), lo que exige políticas basadas en evidencias científicas. La replicabilidad de este enfoque en otros ecosistemas áridos podría contribuir a mitigar impactos globales de la contaminación edáfica.

Por último, el diseño de estrategias como la biorremediación —con plantas hiperacumuladoras (*Brassica juncea*) y microorganismos— emerge como solución sostenible para descontaminar suelos. Paralelamente, políticas estrictas para regular vertidos industriales, promover el reciclaje con economía circular y mejorar el tratamiento de aguas residuales son prioritarias. Programas de monitoreo continuo, basados en protocolos estandarizados y tecnologías geoespaciales, permiten identificar puntos críticos y evaluar riesgos en tiempo real. La cooperación intersectorial (gobiernos, industria, academia) es clave para implementar estas medidas, especialmente en regiones con alta presión minera o agrícola. Iniciativas alineadas con los ODS 6 (agua limpia) y 15 (vida de ecosistemas terrestres) son esenciales para preservar cuencas hidrográficas y garantizar la sostenibilidad en contextos de cambio climático y crecimiento poblacional (27,28).

CONCLUSIONES

Los análisis de metales pesados en suelos de la cuenca del río Ica durante la estación seca revelaron concentraciones detectables de arsénico, bario, plomo y cromo, las cuales, en su mayoría, no superaron los límites del Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Estos resultados indicaron una presencia controlada de los contaminantes, sin riesgos inmediatos. Aunque se identificaron residuos en el cauce fluvial, no se encontró una correlación con niveles críticos de contaminación edáfica, lo que sugirió mecanismos naturales de mitigación o un impacto limitado de los desechos. Los análisis estadísticos respaldaron diferencias significativas asociadas a los residuos y reforzaron la necesidad de abordar múltiples variables en la evaluación del suelo. Los resultados destacaron la relevancia de una gestión ambiental integral en la región, con acciones prioritarias como el monitoreo continuo y estudios futuros que exploren factores adicionales para garantizar la sostenibilidad del recurso.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mitra S, Chakraborty A, Tareq A, Emran T, Nainu F, Khusro A, et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *J King Saud Univ - Sci.* 2022;34(3):101865. Doi: 10.1016/j.jksus.2022.101865
2. Ekins P, Gupta J. Perspective: a healthy planet for healthy people. *Glob Sustain.* 2019;2: e20. Doi: 10.1017/sus.2019.17
3. Gutberlet J, Nazim M. Household waste and health risks affecting waste pickers and the environment in low- and middle-income countries. *Int J Occup Environ Health.* 2017;23(4):299-310. Doi: 10.1080/10773525.2018.1484996
4. Banco Mundial. Análisis Ambiental del Perú: Retos para un desarrollo sostenible. Lima, Perú; 2007. 36. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/analisis-ambiental.pdf>
5. Correa OC, Fuentes FEB, Coral RGS. Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray-Perú. *Rev Soc Quím Perú.* enero de 2021;87(1):26-38. Doi: 10.37761/rsqp.v87i1.320
6. Muyulema C, Canga M, Pucha M, Espinosa G. Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos de la Reserva Ecológica de Manglares Cayapas Mataje (REMACAM)-Ecuador. *RIIT Rev Int Investig E Innov Tecnológica.* 2019;7(41):40-61. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-97532019000600003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
7. Kaza S, Yao L, Bhada P, Van Woerden F. WHAT A WASTE 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. NW, Washington DC: World Bank Group; 2018. 231. (Urban Development Series). <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/92a50475-3878-5984-829e-0a09a6a9badc/content>
8. Ayoola O, Damilola O, Tolulope A, Olaitan O. Heavy Metal Contents of Soil and Plant Species Around Open Dumpsites in Selected Communities in Ekiti State, Nigeria. *J Life Sci.* 2024;4(1):80-9. https://journals.futa.edu.ng/papers/paper_9_1725642312.pdf
9. Alamu M, Adeyinka A, Kehinde I, Akinkunmi O, Oyindamola F. Evaluation of Heavy Metals in Soils from Different Dumpsites. *Int J Eng Inf Syst IJEAIS.* 2021;5(12):137-43. <http://ijeais.org/wp-content/uploads/2021/12/IJEAIS211214.pdf>

- 10.** Huaranga F, Méndez E, Quilcat V, Bernui F, Costilla N, Huaranga F. Fitoextracción de Pb y Cd, presentes en suelos agrícolas contaminados por metales pesados por el rabo de zorro *Lolium multiflorum* L. (Poaceae). *Arnaldoa*. 2021;28(1):149-62. Doi: 10.22497/arnaldoa.281.28109
- 11.** García D, Lima A, Ruiz L, Santana L, Calderón A. Agroecosistemas con probables riesgos a la salud por contaminación con metales pesados. *Rev Cuba Quím*. 2016;28(1):378-93. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-54212016000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- 12.** Pérez W. Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. *Rev ION*. 2021;34(1):37-45. Doi: 10.18273/revion.v34n1-2021004
- 13.** Mekonnen B, Haddis A, Zeine W. Assessment of the Effect of Solid Waste Dump Site on Surrounding Soil and River Water Quality in Tepi Town, Southwest Ethiopia. *J Environ Public Health*. 2020;2020(1):5157046. Doi: 10.1155/2020/5157046
- 14.** Vongdala N, Tran H, Xuan T, Teschke R, Khanh T. Heavy Metal Accumulation in Water, Soil, and Plants of Municipal Solid Waste Landfill in Vientiane, Laos. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(1):22. Doi: 10.3390/ijerph16010022
- 15.** Adamcová D, Vavrková MD, Bartoň S, Havlíček Z, Břoušková E. Soil contamination in landfills: a case study of a landfill in Czech Republic. *Solid Earth*. 2016;7(1):239-47. Doi: 10.5194/se-7-239-2016
- 16.** Espinoza R, Cárdenas J, Echegaray G. Presencia de metales pesados en suelos agrícolas de la subcuenca Llallimayo, departamento de Puno. *CT Riqchary Rev Investig En Cienc Tecnol*. 2022;4(1):12-9. Doi: 10.57166/riqchary/v4.n1.2022.83
- 17.** Llanos M, Muñiz A, Muñiz H, Lorenzo V, Cotrina G. Contaminación por metales pesados de microcuenca del río Alto Huallaga y suelos agrícolas. *Rev Alfa*. 2024;8(22):41-8. Doi: 10.33996/revistaalfa.v8i22.246
- 18.** Quispe F, Belizario G, Chui N, Huaquisto S, Calatayud P, Yábar S. Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Rev Boliv Quím*. 2019;36(2):83-90. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0250-54602019000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- 19.** González O, Murga R. Evaluación de metales pesados en ríos y truchas *Oncorhynchus mykiss* de la región Pasco, Perú. *Rev Iberoam Ambiente Sustentabilidad*. 2020;3(2):32-48. Doi: 10.46380/rias.v3i2.93
- 20.** Díaz W. Evaluación de la contaminación del suelo por lixiviados del botadero Municipal del Distrito de San Pablo - 2018. [Tarapoto, Perú]: Universidad César Vallejo; 2019. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31560>
- 21.** FAO, ITPS. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy; 2015. 607. <https://openknowledge.fao.org/items/f16010ce-1874-4108-bd03-a6a592e2e53a>
- 22.** Weil R, Brady N. The Nature and Properties of Soils. *Soil Sci Soc Am J*. 2016;80(5):1428-1428. Doi: 10.2136/sssaj2016.0005br
- 23.** Ejaz U, Khan S, Shah F, Khalid N, Jehangir S, Rizvi Z, et al. Integrative data-driven analytics for assessing ecological and human health risks of soil heavy metal contamination. *J Hazard Mater Adv*. 2025; 17:100596. Doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100596
- 24.** MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Lima, Perú; 2017. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- 25.** Zhang P, Qin C, Hong X, Kang G, Qin M, Yang D, et al. Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China. *Sci Total Environ*. 2018;633: 1136-47. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.228

26. ONEP. Recycling Rates of Metals A Status Report. ONU; 2011. 42. <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>

27. Marrero J, Amores I, Coto O. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. ICIDCA. 2012;46(3):52-61. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988007>

28. Montenegro S, Pulido S, Vallejo F. Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. Notas Campus. 2019; 1:49. Doi: 10.22490/notas.3451