



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS
EN SEDIMENTOS EN LOS AFLUENTES DE LA CUENCA DEL RÍO RAMIS -
PUNO**

PRESENTADA POR:

ALBERTO CHOQUECOTA RIVA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2023

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS EN LOS AFLUENTES DE LA CUENCA DEL RÍO RAMIS - PUNO

AUTOR

ALBERTO CHOQUECOTA RIVA

RECuento DE PALABRAS

31717 Words

RECuento DE CARACTERES

164457 Characters

RECuento DE PÁGINAS

129 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

90.2MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 23, 2023 8:01 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 23, 2023 8:04 AM GMT-5

● **16% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 7% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)


Dr. German Belizario Quispe
DOCENTE - UNA - PUNO





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE

TESIS

**VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS
EN SEDIMENTOS EN LOS AFLUENTES DE LA CUENCA DEL RÍO RAMIS -
PUNO**



PRESENTADA POR:

ALBERTO CHOQUECOTA RIVA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE


.....
Dr. LUIS VICENTE OLIVERA MARCHO

PRIMER MIEMBRO


.....
Dr. MARCELINO JORGE ARANIBAR ARANIBAR

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Ph.D. ELMER ELIO CALIZAYA LLATASI

ASESOR DE TESIS


.....
D.Sc. GERMÁN BELIZARIO QUISPE

Puno, 31 de octubre del 2023

ÁREA : Ciencia de la Ingeniería.

TEMA : Metales pesados en sedimentos.

LÍNEA: Recursos Naturales y Medio Ambiente.



DEDICATORIA

Las mariposas tienen alas, por lo que pueden volar. Los peces tienen branquias, por lo que pueden nadar. Los conejos tienen cuatro patas, por lo que pueden correr. Y yo tengo un corazón que no para de quererlos cada día más a mis hijos.

*Por ello, dedico este trabajo de investigación a mis hijos, **Sandra Angelit, Yasmin Antuanet y Miguel Alberto**, por ser motivo de mi superación y lucha constante en esta vida.*

Cuando siento que no puedo más, miro a mis hijos y me doy cuenta de que por ellos soy capaz de luchar contra todo y contra todos.

Gracias amados hijos...!



AGRADECIMIENTOS

- *A Dios todo poderoso, por darme la oportunidad de existir y de contribuir en algo en esta vida.*
- *A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, por la oportunidad de estudiar el doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en sus aulas.*
- *A mi asesor de tesis, Dr. Germán Belizario Quispe, por su orientación y apoyo incondicional.*
- *A los miembros del Jurado: Dr. Luis Vicente Olivera Marocho; Dr. Marcelino Jorge Aranibar Aranibar y el Ph.D. Elmer Elio Calizaya Llatasi, por su valioso tiempo que han invertido en la revisión del presente trabajo de investigación.*
- *A todos mis familiares y amigos, quienes fortalecieron mi desarrollo personal y profesional.*



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	2
1.1.1 Metales pesados	2
1.1.2 Sedimentos	3
1.1.3 Los metales pesados en sedimentos más importantes según SQG	4
1.1.4 Transferencia trófica de metales pesados	5
1.1.5 Toxicidad de los metales pesados en la salud de las personas	9
1.2 Antecedentes	10
1.2.1 Estudios sobre calidad de sedimentos	10
1.2.2 Normatividad internacional sobre calidad de sedimentos	27
1.2.3 Normatividad nacional sobre calidad de sedimentos	29

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	31
---------------------------------	----



2.2 Enunciados del problema	33
2.2.1 Problema general	33
2.2.2 Problemas específicos	33
2.3 Justificación	33
2.4 Objetivos	35
2.4.1 Objetivo general	35
2.4.2 Objetivos específicos	35
2.5 Hipótesis	36
2.5.1 Hipótesis general	36
2.5.2 Hipótesis específicas	36

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio	37
3.2 Población	37
3.3 Muestra	39
3.4 Método de investigación	41
3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	41
3.5.1 Evaluación de la concentración de los metales pesados en sedimentos	41
3.5.2 Evaluación de la calidad de sedimento	43
3.5.3 Análisis de variación espacial de la concentración de metales pesados	49

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de la concentración de los metales pesados en sedimentos	51
4.1.1 Resultados de ensayos en el laboratorio	51
4.1.2 Comparación de resultados con otros estudios a nivel local	53
4.1.3 Comparación de resultados con otros estudios a nivel nacional	55
4.1.4 Comparación de resultados con otros estudios a nivel internacional	57



4.1.5 Análisis estadístico	61
4.2 Evaluación de la calidad de sedimentos	66
4.2.1 Evaluación mediante Directrices de la calidad de sedimentos	66
4.2.2 Factor de Enriquecimiento	70
4.2.3 Índice de Geoacumulación	73
4.2.4 Índice de carga de contaminación	74
4.2.5 Riesgo ecológico potencial	76
4.3 Análisis de variación espacial de la concentración de metales pesados	78
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	100

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Metales pesados y la toxicidad en la salud de las personas	9
2. Valores de efecto bajo (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)	28
3. Valores de Efecto Medio (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)	28
4. Valores de Efecto Extremo (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)	29
5. Valores de concentración de metales pesados en sedimentos (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)	30
6. Puntos de muestreo de sedimentos	40
7. Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento	45
8. Factor de Enriquecimiento (FE) en relación con la calidad de sedimento	46
9. Clases de I_{geo} en relación con la calidad de sedimento	47
10. Factor de Contaminación (FC) e Índice de Carga de Contaminación (PLI)	47
11. Categoría de factor de riesgo ecológico potencial (E_i) e Índice de Riesgo (IR)	49
12. Concentración de metales pesados (mg/kg d.w.) en los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis	52
13. Comparación de resultados con otros estudios, concentración promedio de metales pesados en sedimentos (mg/kg d.w.) cuenca Azángaro e intercuenca Ramis	54
14. Comparación de concentración promedio de metales pesados en sedimento (mg/kg d.w.) a nivel nacional	56
15. Comparación de metales pesados en sedimentos con valores de TEC y PEC a nivel nacional	57
16. Comparación de concentración promedio de metales pesados en sedimento (mg/kg d.w.) con otros estudios a nivel internacional	58
17. Comparación de metales pesados en sedimento con valores de TEC y PEC a nivel internacional	60
18. Estadísticos descriptivos Cuenca Pucará	62
19. Estadísticos descriptivos Cuenca Azángaro	62
20. Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), Cuenca Pucará	63
21. Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), Cuenca Azángaro	63
22. Matriz de correlación de Pearson entre metales - Cuenca Pucará	64
23. Matriz de correlación de Pearson entre metales - Cuenca Azángaro	64



24. Matriz de coeficiente de puntuación de componentes principales - Cuenca Pucará	65
25. Matriz de coeficiente de puntuación de componentes principales - Cuenca Azángaro	66
26. Número de muestras y % que representa <TEC, entre TEC y PEC y >PEC de los valores de concentración de metales pesados en sedimentos	67
27. Factor de Enriquecimiento (FE) de la cuenca del río Ramis	70
28. Número de muestras y % de cada clase de Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento	71
29. Número de muestras y % del Factor de Enriquecimiento (FE) en relación con la calidad de sedimento	72
30. Índice de Geoacumulación (Igeo) de la cuenca del río Ramis	73
31. Número de muestras y % de cada clase de Índice de Geoacumulación (Igeo) en relación a la calidad de sedimento	74
32. Índice de Carga de Contaminación (PLI) en la cuenca del río Ramis	75
33. Número de muestras y % de cada clase de Factor de Contaminación (FC) en relación a la categoría de contaminación	76
34. Índice de Riesgo Potencial (Ei) en la cuenca del río Ramis	77
35. Número de muestras y % de cada clase de Índice de Riesgo Ecológico (Ei) y categoría de riesgo ecológico	77



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Esquema que representa los términos y conceptos utilizados en la transferencia trófica de metales pesados	7
2. Transferencia trófica de metales pesados desde agua dulce y sedimentos a la cadena alimentaria humana	7
3. Ubicación de la zona de estudio	38
4. Componentes principales en espacio rotado - Cuenca Pucará	65
5. Componentes principales en espacio rotado - Cuenca Azángaro	66
6. Distribución espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en la cuenca del río Ramis. (A) Arsénico; (B) Cadmio; (C) Cromo; (D) Cobre; (E) Mercurio; (F) Plomo; (G) Níquel y ((H) Zinc.	81



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Mapa de puntos de muestreo	101
2. Informe de Ensayo No 2-0211/18 del laboratorio CERPER S.A.	103
3. Memoria fotográfica	114

RESUMEN

En la cuenca del río Ramis, parte de la cuenca del lago Titicaca del Perú, hay algunas evidencias de elevadas concentraciones de metales pesados, fundamentalmente producto de la actividad minera. Razón por el cual, se realizó el presente estudio con el fin de evaluar la concentración de metales pesados en sedimentos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn) en sus diferentes afluentes. El muestreo de sedimentos se realizó en 26 puntos dentro de la cuenca, según el protocolo de muestreo *Sediment Sampling de EPA*. Las muestras fueron analizadas en “Certificaciones del Perú S.A.”. Laboratorio acreditado por INACAL. Mediante el método de Metales Totales ICP-MS: EPA METHOD 6020A, Revisión 1. 2007. La evaluación de la calidad de sedimentos se realizó mediante directrices de SQG (Valores de TEC y PEC); Factor de Enriquecimiento (EF); Índice de Geoacumulación (Igeo); Índice de Carga de Contaminación (PLI) y Riesgo Ecológico Potencial (Ei), y la evaluación espacial se realizó mediante el método Kriging. Las concentraciones promedias fueron: As=105.5; Cd=0.88; Cr=11.60; Cu=42.89; Hg=1.17; Pb=22.58; Ni=10.29 y Zn=119.80mg/kg, respectivamente. La calidad sedimentos indican que existe riesgos principalmente por As y Hg. La distribución espacial indica que hay mayor concentración de As (QLuor1, LRinc1, RGran2, RAzuf1, RPata2 y RChac2); Cd (RChaq1 y RChaq2); Cr y Cu (RAzuf1, RPata2 y RChac2); Hg (QLuor1, LRinc1 y RLari1) Pb (RAzuf1, RPata2, RChac2, RChac3, RCruc2 y RCruc3), Ni (RCruc2, RGran2 y RStro1) y Zn (RCruc2), consideradas como zonas críticas.

Palabras clave: Cuenca río Ramis, lago Titicaca, metales pesados, método Kriging, sedimentos.

ABSTRACT

SPACIAL VARIATION OF THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN SEDIMENTS IN THE AFFLUENTS OF THE RAMIS RIVER BASIN - PUNO

ABSTRACT

In Ramis River basin, part of the Titicaca Lake basin of Peru, there is some evidence of high concentrations of heavy metals, mainly as a product of mining activity. For this reason, the present study was carried out in order to evaluate the concentration of heavy metals in sediments (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni and Zn) in its different tributaries. Sediment sampling was carried out at 26 points within the basin, according to the EPA Sediment Sampling, sampling protocol. The samples were analyzed in "Certificaciones del Perú S.A.". Laboratory accredited by INACAL. Using the ICP-MS Total Metals method: EPA METHOD 6020A, Revision 1. 2007. The evaluation of sediment quality was carried out using SQG guidelines (TEC and PEC Values); Enrichment Factor (EF); Geoaccumulation Index (Igeo); Pollution Load Index (PLI) and Potential Ecological Risk (Ei), and the spatial evaluation was carried out using the Kriging method. The average concentrations were: As=105.5; Cd=0.88; Cr=11.60; Cu=42.89; Hg=1.17; Pb=22.58; Ni=10.29 and Zn=119.80mg/kg, respectively. The sediment quality indicates that there are risks mainly due to As and Hg. The spatial distribution indicates that there is a higher concentration of As (QLuor1, LRinc1, RGran2, RAzuf1, RPata2 and RChac2); Cd (RCha1 and RCha2); Cr and Cu (RAzuf1, RPata2 and RChac2); Hg (QLuor1, LRinc1 and RLari1) Pb (RAzuf1, RPata2, RChac2, RChac3, RCruc2 and RCruc3), Ni (RCruc2, RGran2 and RStro1) and Zn (RCruc2), considered as critical zones.

Keywords: Heavy metals, Sediments, Kriging Method, Ramis river Basin, Lake Titicaca.

V^oB^o



Dr. Miguel Pacheco Tanaka
C.C.F. 01222

INTRODUCCIÓN

Durante años, uno de los problemas en la región Puno, ha sido la contaminación de las aguas y sedimentos, fundamentalmente en la cuenca del río Ramis, donde se desarrolla la actividad minera formal e informal en la parte alta de dicha cuenca. Esta cuenca está conformada por dos unidades hidrográficas, la primera es la subcuenca del río Azángaro donde en la parte alta se desarrolla la actividad minera en las localidades de La Rinconada y Ananea. Y, por otro lado, en la subcuenca del río Pucará donde opera la minera Aruntani. Los afluentes de ambos ríos desembocan finalmente en el lago Titicaca con concentraciones altas de metales pesados (Gammons et al., 2006).

En los últimos tiempos estos temas han sido motivo de álgidas protestas y seguramente serán razón suficiente para generarse nuevos conflictos sociales en la región Puno, principalmente por la contaminación del agua por el momento; sin embargo, aún no está en discusión la calidad de los sedimentos de esos ríos, que con toda seguridad contienen metales pesados como indican los pocos estudios que se tiene al respecto.

Los sedimentos en los ríos acumulan metales pesados como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn, que son tóxicos o dañinos para el ser humano cuando superan las concentraciones establecidas por las normas internacionales para sedimentos. Algunos metales son bioacumulativos en las plantas y animales, y fundamentalmente en el ser humano y que probablemente viene ocurriendo en los afluentes de la cuenca del río Ramis, en donde hay una intensa actividad económica de la minería en la zona de La Rinconada y Ananea.

Los objetivos específicos de la presente tesis fueron: Determinar el nivel de concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo de afluentes de la cuenca del río Ramis; evaluar la calidad de los sedimentos a través de los diferentes índices de contaminación y comparado con los valores de Estándar de Calidad Ambiental para sedimentos de normas internacionales, y evaluar la variación espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo en los afluentes de la cuenca del río Ramis, con fines de identificar las zonas de alto riesgo ambiental en ecosistemas acuáticos.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 Metales pesados

No hay una definición precisa sobre “metal pesado”. Según Duffus (2002) define como un miembro del grupo de elementos químicos que exhibe propiedades metálicas; se incluyen principalmente metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. El autor indica además, que muchos investigadores han propuesto definiciones diferentes, unos basados en la densidad, otros en número atómico o peso atómico, y algunas en sus propiedades químicas o de toxicidad; además, a menudo se asocia con la contaminación, toxicidad o ecotoxicidad; sin embargo, no existe una definición universal en la literatura relevante, el término “metal pesado” es considerado como una “mala denominación” así indica en su informe técnico de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), debido a su definición contradictoria y su falta de “bases de coherencia científica”.

En el artículo publicado por H. Ali et al. (2019) indica que un “metal pesado” se define como “metales naturales que tienen un número atómico mayor de 20 y una densidad mayor de 5 g/cm³”. En cuanto a sus roles en sistemas biológicos, se clasifican como esenciales y no esenciales. Los esenciales son importantes para la vida de los organismos en concentraciones bajas (Mn, Fe, Cu y Zn) y los no esenciales (Cd, Pb y Hg) son tóxicos para las plantas, animales y humanos, inclusive a concentraciones muy bajas y se consideran biológicamente no necesarias.

Los metales pesados son elementos naturales que tienen una densidad al menos cinco veces mayor que la del agua. Su toxicidad en los humanos depende de varios

factores, incluyendo la dosis, la ruta de exposición y el metal, así como la edad, la genética y el estado nutricional de las personas expuestas. Debido a su alto grado de toxicidad de As, Cd, Cr, Pb y Hg se encuentra entre los metales prioritarios en la salud pública. Estos elementos metálicos inducen daño a múltiples órganos, incluso a niveles más bajos de exposición. También están clasificados como carcinógenos para los seres humanos (Tchounwou et al., 2012).

Los metales pesados son un grupo de metales y metaloides que tienen una densidad relativamente alta y son tóxicos incluso a niveles de ppb. La ingesta excesiva de metales pesados en el cuerpo humano a través del medio ambiente puede causar diversos problemas de salud humana (Patle et al., 2022).

Las principales fuentes de metales pesados como contaminantes ambientales son los desechos industriales y agrícolas, la minería, los relaves, la exposición ocupacional y las pinturas, etc. Por otro lado, algunos metales pesados son altamente tóxicos debido a su uso extensivo y su amplia distribución en el medio ambiente. Los límites permisibles de metales pesados han sido informados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), etc. (Kim & Kim, 2020).

Los metales tóxicos no biodegradables son dañinos para todos los seres vivos con graves consecuencias para la salud. El crecimiento exponencial de la población y la economía ha dado lugar a una serie de preocupaciones ambientales en las últimas décadas (Nguyen et al., 2020). De ellos, la contaminación por metales pesados o elementos tóxicos en los ecosistemas acuáticos (es decir, ríos, afluentes, canales, lagos/embalses) son especialmente visibles ya que ciertos metales son tóxicos permanentes, lo que plantea importantes riesgos ecológicos y humanos (Proshad et al., 2022).

1.1.2 Sedimentos

El Consejo de Ministros de Medio Ambiente de Canadá (CCME EPC-98E, *Canadian Council of Ministers of the Environment*) en 1995 presenta el “Protocolo para la evaluación de la calidad de los sedimentos, pautas para la protección de la vida acuática” donde define el término “sedimento” como los

depósitos del fondo en ambientes acuáticos compuestos por partículas materiales de diversos tamaños, formas, y de diversas fuentes mineralógicas (CCME, 1999). La contaminación de sedimentos con metales pesados es un problema ambientalmente importante con consecuencias para los organismos acuáticos y la salud humana. Los sedimentos actúan como el principal depósito de metales en el medio acuático. Su calidad puede indicar el estado de contaminación del agua (Zahra et al., 2014).

Los sedimentos sirven como sumidero y fuente de metales pesados, liberándolos en la columna de agua. La deposición continua de metales pesados en los sedimentos también puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas con estos contaminantes (Sanyal et al., 2015).

Por otro lado, H. Ali et al. (2019) indica que las concentraciones de los metales pesados en los sedimentos son afectadas por muchos factores fisicoquímicos como la temperatura, condiciones hidrodinámicas, estado redox, contenido de materia orgánica. La biodisponibilidad en los sedimentos depende del pH. Una disminución en el pH aumenta. La competencia entre iones metálicos y H^+ y puede dar lugar a la disolución de complejos metálicos, liberando así iones metálicos libres en la columna de agua. Las concentraciones más altas de metales pesados tóxicos en los sedimentos fluviales pueden representar un riesgo ecológico para los bentos (organismos que viven en el fondo del río).

1.1.3 Los metales pesados en sedimentos más importantes según SQG

Según Sediment Quality Guidelines (SQG) definido por MacDonald et al. (2000) y otros artículos científicos de mayor relevancia a nivel internacional, dan mayor importancia para su estudios en la actualidad a ocho (08) metales pesados:

- Arsénico (As)
- Cadmio (Cd)
- Cromo (Cr)
- Cobre (Cu)
- Mercurio (Hg)
- Plomo (Pb)
- Níquel (Ni)

- Zinc (Zn)

Por otro lado, la contaminación por metales pesados en suelos y sedimentos (fluviales/marinos) y su impacto en la salud humana han inducido una consideración global debido a su bioacumulación, no biodegradabilidad, toxicidad y persistencia. La evaluación del riesgo ecológico de los metales pesados en suelos y sedimentos ha sido bien estudiada en diferentes países, sin embargo, hay muy pocos estudios en los que se haya comparado la evaluación del riesgo ecológico de los metales pesados en diferentes países (V. Kumar et al., 2022).

1.1.4 Transferencia trófica de metales pesados

Los metales pesados pueden ingresar directamente al cuerpo de un organismo del ambiente abiótico (agua, aire, suelo, sedimento) o biótico (al consumir otro organismo como su alimento o presa). Por ejemplo, pueden ingresar al cuerpo directamente desde agua o sedimentos a través de las branquias/piel o desde su comida a través de su cadena alimenticia. La concentración de un metal pesado puede aumentar o disminuir a lo largo de los diferentes niveles tróficos subsiguientes (Ver figura 1) (H. Ali et al., 2019).

En la transferencia trófica de los metales pesados, puede ocurrir los siguientes mecanismos según (H. Ali et al., 2019; Gray, 2002):

- **Bioconcentración:** se define como la absorción de un químico (metal pesado) por un organismo directamente del ambiente abiótico que resulta en una mayor concentración dentro del organismo.
- **Bioacumulación:** se define como la absorción de un químico por un organismo vivo desde el ambiente abiótico y/o biótico (alimento); es decir, de todas fuentes y concentrándolo en el organismo. Una vez que los contaminantes están dentro de un organismo, puede metabolizarse y/o excretarse de modo que la concentración sea un equilibrio entre la ingesta y la excreción.

- **Biomagnificación:** es el proceso de transferencia de un xenobiótico químico que se transfieren de los alimentos a un organismo, lo que resulta en concentraciones más altas en comparación con la fuente. Sin embargo, no todos los autores utilizan el mismo concepto, otros definen biomagnificación como el aumento de la concentración de un nivel trófico a otro. De esa manera, en el caso de que el factor de biomagnificación (concentración en el predador/concentración en la presa) sea mayor que 1, el compuesto es biomagnificable.
- **Biodisponibilidad:** En los sistemas acuáticos, la biodisponibilidad del metal depende de las características locales del agua y los sedimentos; por lo tanto, los riesgos son específicos del sitio. La biodisponibilidad del metal es un fenómeno complejo, controlado por muchos factores y procesos, incluido el pH, el contenido de carbono orgánico, dureza del agua, alcalinidad, oxígeno disuelto y sulfuros, influencia de otros metales (Väänänen et al., 2018).
- **Bioacumulación y Biomagnificación de metales pesados en las cadenas alimentarias humanas:** Los humanos son omnívoros, pueden estar expuestos a metales pesados a través de diferentes alimentos como el pescado, cereales o vegetales. Los metales representan una amenaza para la salud humana (Ver figura 2). Ciertos ejemplos desde el siglo XX han demostrado la contaminación es el caso de Minamata (consumo de pescado con Hg) y Itai-Itai (consumo de arroz con Cd) ambos en Japón (H. Ali et al., 2019).

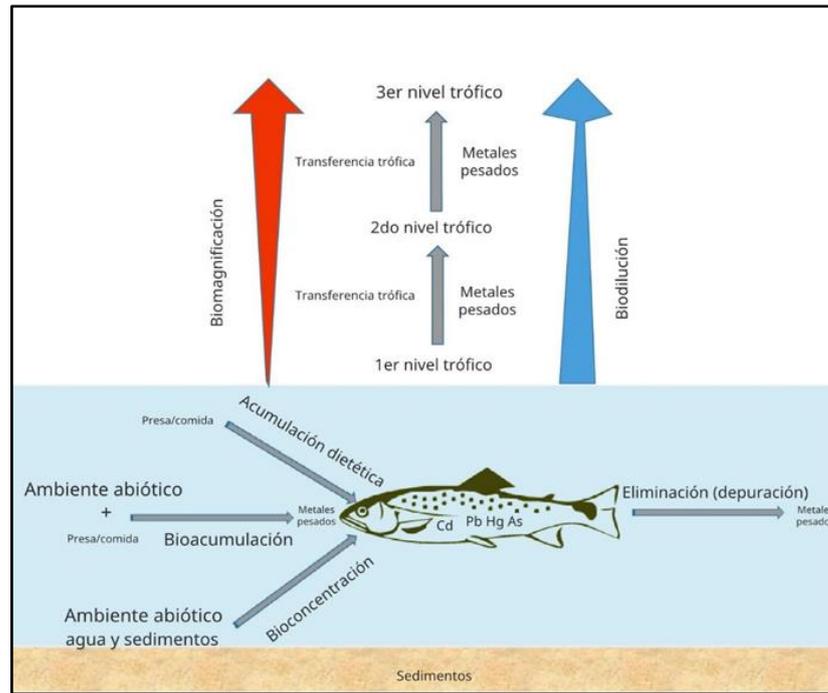


Figura 1. Esquema que representa los términos y conceptos utilizados en la transferencia trófica de metales pesados

Fuente: H. Ali et al. (2019).

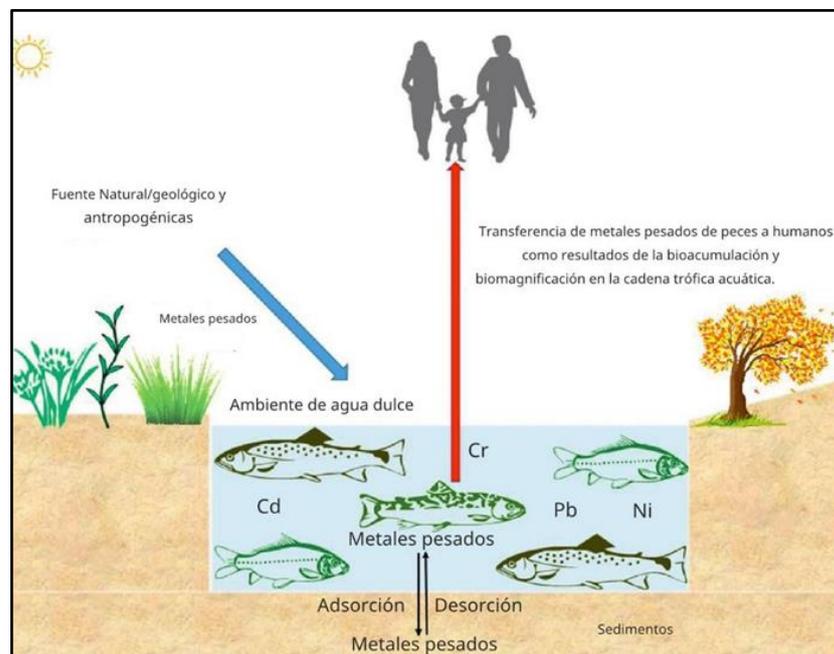


Figura 2. Transferencia trófica de metales pesados desde agua dulce y sedimentos a la cadena alimentaria humana

Fuente: H. Ali et al. (2019).

- ***Impactos de los metales pesados en las plantas y microorganismos:*** los metales pesados provocan impactos en las plantas y microorganismos de la forma siguiente:

El **As** provoca el deterioro de la membrana celular, reducción del crecimiento y extensión y producción de raíces, se restringe con rutas metabólicas peligrosas, se pierde fertilidad, rendimiento y producción de frutos y estrés oxidativo (Abdul-Wahab & Marikar, 2011). El **Cd** provoca la reducción del consumo de oxígeno. Clorosis, disminución de nutrientes de las plantas, crecimiento y germinación de semillas (Chibuike & Obiora, 2014). El **Cr** provoca la clorosis, marchitez, lesiones bioquímicas, disminución de la germinación de la biosíntesis, crecimiento diminuto y estrés oxidativo (Sharma et al., 2020). El **Cu** influye en la clorosis, el estrés oxidativo e impide el crecimiento de las plantas. Disloca el papel celular y dificulta las actividades enzimáticas en los microorganismos (V. Kumar et al., 2021).

El **Hg** altera el sistema antioxidante y la fotosíntesis, aumenta la peroxidación lipídica, reduce el impacto genotóxico, reduce el crecimiento de las plantas, el rendimiento, la absorción de nutrientes y la homeostasis y el estrés oxidativo. Disminución del tamaño de la población, desnaturalización de proteínas, alteración de la membrana celular y papel de las enzimas en los microorganismos (Jianxu Wang et al., 2012). El **Pb** altera la fotosíntesis, el crecimiento y la clorosis, reduce las actividades enzimáticas y la germinación de las semillas y el estrés oxidativo en las plantas (Wuana & Okieimen, 2011). El **Ni** provoca la degeneración de proteínas y ácidos nucleicos y dificulta las actividades enzimáticas y la transcripción. Reduce el contenido de clorofila, las actividades enzimáticas y el crecimiento y la absorción de nutrientes. Disloca la membrana celular e impide las actividades enzimáticas en los microorganismos (Fashola et al., 2016). El **Zn** reduce la fotosíntesis, la tasa de crecimiento, el contenido de clorofila, la tasa de germinación y la biomasa vegetal. Desaparición, impedimento de la biomasa y crecimiento de microorganismos (Chibuike & Obiora, 2014).

1.1.5 Toxicidad de los metales pesados en la salud de las personas

En el artículo científico “*Heavy Metal Toxicity and the Environment*” publicado por Tchounwou et al. (2012), indica la toxicidad de los metales pesados en el ambiente y la salud de las personas es la siguiente: (Tabla 1).

Tabla 1

Metales pesados y la toxicidad en la salud de las personas

Elemento	Efectos en la salud de las personas
As	La mayoría de los casos de toxicidad humana por arsénico se han asociado con exposición al arsénico inorgánico. El arsenito trivalente inorgánico [As (III)] es de 2 a 10 veces más tóxico que el arseniato pentavalente [As (V)]. Aunque muchos estudios recientes atribuyen al arsénico como promotor del cáncer, aún no se ha alcanzado un consenso científico.
Cd	La ingestión de Cd puede causar daño en el tracto gastrointestinal; lesión pulmonar, hepática o renal y coma, dependiendo de la ruta de ingreso. La exposición crónica al Cd tiene un efecto depresivo sobre los niveles de noradrenalina, serotonina y acetilcolina.
Cr	La evidencia epidemiológica apunta fuertemente a Cr (VI) como el agente de carcinogénesis, es citotóxico y capaz de inducir efectos que dañan el ADN, como anomalías cromosómicas, roturas de cadenas y fragmentación de ADN y generación de células de carcinoma en el hígado humano.
Cu	Puede generar diversas alteraciones como: anemia hipocrómica, disminuye la tasa de crecimiento, diarreas, cambios de coloración del pelo o de lana, ataxia neonatal, alteración del crecimiento, infertilidad temporal e insuficiencia cardíaca.
Hg	El Hg afecta a los orgánulos celulares y sus propiedades biológicas. En estudios recientes demuestran al Hg como agente genotóxico, Por lo tanto, el Hg ha sido demostrado inducir la formación de ROS (radicales libres) se sabe que causa daño en el ADN de las células, un proceso que puede conducir al inicio de procesos cancerígenos.
Pb	El Pb actúa interfiriendo con el calcio procesos relacionados con la señalización neuronal y la transducción de señal intracelular.
Ni	El Ni provoca bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer de los pulmones, han ocurrido en personas que han respirado polvo que contenía compuestos de Ni en el trabajo en refinerías de Ni.
Zn	Un exceso de Zn causa náuseas, mareos, dolores de cabeza, malestar estomacal, vómitos y pérdida del apetito. El consumo excesivo y prolongado de Zn puede afectar el sistema inmunitario y bajar los niveles de colesterol.

Fuente: (Londoño et al., 2016; Tchounwou et al., 2012)

1.2 Antecedentes

1.2.1 Estudios sobre calidad de sedimentos

A nivel internacional

Existen muchos estudios a nivel internacional respecto a la concentración de metales pesados en sedimentos de agua dulce, principalmente en los países de Asia, Europa, Norteamérica y muy reducido en Latinoamérica; a continuación, hacemos referencia a los más importantes para el presente estudio.

Un estudio muy importante se publicó en el año 2015, que trata sobre un estudio sistemático de sedimentos geoquímicos en los 22 lagos de agua dulce en China. En ella tomaron 4639 muestras entre sedimento lacustre (0–20 cm) a una densidad de 1 muestra/4 km² y sedimento lacustre profundo (150–180 cm) a una densidad de 1 muestra/16 km². Evaluaron el riesgo ecológico para la contaminación por metales tóxicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) y compararon con los valores de PEC y TEC de (MacDonald et al. (2000)). Estos resultados han proporcionado información valiosa para mejorar gestión de prevención y control de la contaminación de los lagos de China (Cheng et al., 2015)

En el estudio *“Heavy metal pollution in sediments of the largest reservoir (Three Gorges Reservoir) in China: a review”*, la Presa de las Tres Gargantas en China es la presa más grande del mundo, y juega un papel importante en el desarrollo económico y seguridad de agua potable en China. Sin embargo, es sumidero y fuente de metales pesados en agua y sedimentos. Este estudio revisó todos los artículos disponibles publicadas sobre metales pesados en sedimentos de (Three Gorges Reservoir TGR) y además proporcionó una evaluación integral de la tendencia de contaminación por metales pesados. Los resultados mostraron que las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de TGR varían temporal y espacialmente. En la corriente principal hay presencia de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, así como Hg en los afluentes (X. Zhao et al., 2017).

En el artículo *“Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China”* de (Zhang et al., 2018). Realizaron el estudio 10 metales pesados (Sb, Cd, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As y Pb) en 49 muestras de sedimentos del río Zijiang en China, donde

determinaron Índices de contaminación, incluido el índice de geoacumulación, índice de riesgo ecológico potencial para evaluar la contaminación por metales pesados en los sedimentos del río Zijiang. Los resultados indicaron que los valores de metales pesados en los sedimentos del río Zijiang fueron significativamente más altos que los correspondientes valores de fondo. Pero cuando se compara con otros ríos del mundo, estaban en niveles medios excepto para Sb. Además, se realizó una comparación de las concentraciones de metales pesados en sedimento basado en valores de consenso de MacDonald et al. (2000) como TEC y PEC, respectivamente. Se identificaron tres fuentes principales de contaminantes de Co, Zn, Cd y Cu que derivan principalmente de productos agrícolas; Sb, Mn y Pb que provienen de actividades de minería y fundición y Cr y Ni de fuentes naturales.

En otro artículo denominado “*Distribution, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in River Sediments from Hai River and Its Tributaries, Tianjin, China*” de Kang et al. (2020) analizaron 32 muestras de sedimentos superficiales para evaluar niveles de nutrientes y contenido de metales pesados (Mo, Cu, Zn, Ni, Cd, Pb y Cr) en el río Hai y sus afluentes, que es el río más grande que desemboca en la bahía de Bohai. El grado de enriquecimiento y valor de geoacumulación de los metales estudiados disminuyeron en el mismo orden de Cd > Cu > Pb > Mo > Ni > Zn > Cr, y el contenido medio de Cu y Cd fueron 2.58 y 2.93 veces más altos que sus valores de fondo en Tianjin. Las concentraciones obtenidas han sido comparadas con los valores de TEC y PEC de (MacDonald et al., 2000).

Asimismo, en otro artículo denominado “*Assessing Heavy Metal Contamination in Surface Sediments in an Urban River in the Philippines*” de Decena et al. (2018). En este estudio investigó la contaminación por metales pesados en el río Mangonbangon, un río de la ciudad de Tacloban, Filipinas. Se recogieron muestras de sedimento de 14 puntos de muestreo y se analizaron el contenido total de metales pesados mediante digestión ácida. Los resultados mostraron que el índice de geoacumulación (Igeo) mostraron que los sedimentos no estaban contaminados a moderadamente contaminados con Cu y Zn, mientras que Igeo para todos los demás metales pesados no indicó contaminación. Se realizó la comparación de las concentraciones de metales pesados con las pautas de calidad

de sedimentos basadas en el consenso (SQGs) como TEC y PEC de MacDonald et al. (2000). Los resultados indican que los metales tenían un origen común o un comportamiento geoquímico y estaban asociados con actividades antropogénicas.

En Norteamérica, resalta el estudio denominado “*Toxicity of Metals Associated with Sediments from the Columbia River to Early Life Stages of White Sturgeon*” de Vardy (2014), indica que el río Columbia es un río del suroeste de Canadá y noroeste de Estados Unidos, que fluye en dirección norte-sur-oeste por la provincia de Columbia Británica, en Canadá, y los estados de Washington y Oregón en Estados Unidos, desembocando en el océano Pacífico, con 2044 km es el sexto río más largo de América del Norte, después de Misuri, Misisipi, Bravo, Arkansas y Colorado. En el estudio se ha planteado la hipótesis de que los metales asociados con los sedimentos podrían estar contribuyendo al reclutamiento deficiente del esturión blanco (*Acipenser transmontanus*). En consecuencia, el presente estudio empleó pruebas de flujo de laboratorio para caracterizar la toxicidad crónica de los sedimentos en las primeras etapas de la vida de esturión blanco. Se recogieron sedimentos de zonas de desove y/o crianza y contenían una gama de concentraciones de metales de interés, que incluía Cu, Cd, Pb y Zn. Se evaluaron con las Concentraciones de Efecto Probable (PEC). Los sedimentos de los sitios recolectados para el estudio tenían el riesgo de provocar efectos adversos para los organismos como el esturión blanco.

En Latino América, hay algunos trabajos como “*Trace elements in sediments and fish from Atrato River: an ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific*” de Palacios-Torres et al. (2020); el estudio se desarrolló en Colombia e indica que la cuenca hidrográfica de Atrato se ubica en la selva tropical que tiene especies de vida silvestre excepcionales y se considera una de las áreas más ricas en biodiversidad del planeta, actualmente amenazadas por la minería masiva de oro. El objetivo de este estudio fue cuantificar oligoelementos en sedimentos y peces de la cuenca del Atrato, evaluando su riesgo ambiental y de salud humana. Se analizaron 42 elementos traza mediante ICP-MS. Los factores de concentración (CF) sugieren que los sedimentos estaban moderadamente contaminados por Cr, Cu, Cd y fuertemente contaminados por

As. La mayoría de las estaciones tenía concentraciones de Cr (98%) y Ni (78%) superior a la Concentración de efecto probable (PEC).

Otro estudio "*Environmental pollution by heavy metals in the Sao Joao River basin, southern Brazil*" de da Silva et al. (2017), se realizó en la cuenca del río Sao Joao que está ubicado en un área de conservación estratégica debido a la abundancia de los recursos hídricos y la biodiversidad, pero es fuertemente afectado por la actividad antrópica en el país de Brasil. En este estudio ocho metales fueron evaluados (Cu, Mn, Fe, Zn, Cr, Co, Cd y Pb) en sedimento y agua de diez puntos diferentes en el río Sao Joao. Se evaluó la contaminación de la cuenca del Sao Joao mediante el índice de geoacumulación (Igeo), riesgo ecológico potencial (ERP) y grado de contaminación (Dp). El Igeo presenta índices entre 2 y 3 con 80% de las muestras, indicando contaminación significativa en el sedimento y en los 40% de los puntos muestreados.

En el estudio sobre la concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala, presenta una evaluación sobre la concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) en agua superficial y en sedimentos durante la época de lluvias (agosto de 2011 y junio de 2012) y en época seca (enero de 2012 y diciembre de 2012). Los resultados fueron contrastados con la normativa de Canadá, y también, en el caso de los sedimentos, con los niveles de fondo de referencia para los Estados Unidos de América. Las concentraciones de Hg rebasaron los SQG establecido en la norma (Laino-guanes, 2015)

Por otro lado, en el estudio sobre niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador, se determinaron las concentraciones de Al, Co, Cu, Fe, Hg, Ni, Mn, Pb y Zn en muestras de sedimentos de fondo del río Puyango. El estudio indica que las mayores concentraciones de metales pesados fueron encontradas en los sedimentos colectados en el sector localizado después de la confluencia entre los ríos Calera y Amarillo. Los sedimentos de las secciones media y baja del río Puyango se encuentran severamente contaminados con los elementos como Hg, Cu, Pb, Zn y Mn, así como moderadamente contaminados con Co y Fe. Las altas concentraciones de Hg, Cu, Pb, Zn, Mn y Fe en los sedimentos de estos ríos pueden tener un efecto adverso para la biota acuática, de

acuerdo con los criterios establecidos en normas internacionales (Mora et al., 2016).

Gao et al. (2019) en su trabajo concluye que la distribución espacio-temporales de los metales traza en los sedimentos de la Presa de Tres Gargantas (TGR) en China, durante cinco periodos consecutivos, entre 2015 y 2017. Los resultados mostraron que se acumularon metales después de la construcción del embalse de la TGR. Sin embargo, luego de que la TGR operara normalmente por más de cinco años, las concentraciones de metales trazan se estabilizaron en los sedimentos.

Por otro lado, en la misma zona Bing et al. (2019) estudiaron seis metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en los sedimentos ribereños de toda la corriente principal de la presa tres gargantas (TGR) China en 2014 y 2016 para identificar sus características de contaminación y riesgo y descifrar los principales factores de variación de la contaminación por metales. Los resultados mostraron que las concentraciones de los metales pesados en los sedimentos no variaron significativamente, salvo Cd. Los resultados indicaron que la contaminación por Cd en los sedimentos ribereños de la TGR seguía siendo un problema ambiental vital, y la disminución de los aportes de sedimentos de los principales afluentes aguas arriba de TGR. Las actividades antrópicas determinaron la distribución de la contaminación por metales pesados en los sedimentos ribereños.

En el río Zijiang de China, determinaron la concentración de 10 metales pesados (Sb, Cd, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As y Pb) en 49 muestras de sedimentos del mediante el uso de espectrometría de plasma con emisión óptica acoplada inductivamente. Los índices de contaminación, incluido el índice de geoacumulación, el índice de riesgo ecológico potencial y el factor de riesgo ecológico potencial, fueron utilizados para evaluar la contaminación por metales pesados en los sedimentos del río Zijiang. Los resultados indicaron que los valores medios de metales pesados en los sedimentos fueron significativamente más altos que los valores de fondo correspondientes. Pero al comparar con los de otros ríos del mundo, se encontraban en niveles medios a excepción del Sb. Además, los valores de los índices de contaminación revelaron que la contaminación grave por metales pesados y los riesgos ecológicos potenciales relativamente altos existían principalmente aguas abajo de las fábricas de extracción y fundición de antimonio.

Además, se observaron riesgos ecológicos potenciales altos de Sb en los sitios de muestreo que estaban cerca de esas fábricas y riesgos ecológicos potenciales altos de Cd aguas debajo de éstas (Zhang et al., 2018).

Según Rodríguez-Espinoza et al. (2018) en su estudio indica que se recolectaron 49 muestras de sedimentos en los ríos Zahuapan, río Atoyac; zona de confluencia y presa de Valsequillo para investigar las fuentes geoquímicas, el enriquecimiento, la contaminación y los riesgos ecológicos de los metales en los sedimentos fluviales de la cuenca del río Atoyac México. Se analizaron 23 metales (Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, P, S y Ti) y trazas (Ba, Mn, As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sc, Sr, V, Zn y Zr). Los valores excedieron los valores de fondo locales atribuidos principalmente a los aportes volcánicos naturales. Se utilizaron índices geoquímicos como el factor de enriquecimiento (EF), el índice de geoacumulación (Igeo) y el índice de carga de contaminación (PLI) para evaluar el grado de enriquecimiento del metal; los resultados revelaron influencias externas significativas sobre algunos metales (As, Cu, Pb y Zn). El cálculo del índice de peligros ecológicos potenciales mostró que, entre los 23 metales, los metales As, Pb, Cu, Ni y Cr fueron los principales con riesgo potencial que causarían efectos biológicos dañinos en el medio ambiente fluvial.

Según Wang et al. (2018) estudiaron elementos tóxicos (As, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl, U y Zn) en sedimentos de treinta muestras en el río Anning de China. Las actividades mineras han resultado ser fuentes de grave contaminación en los sedimentos por potencialmente tóxicos, especialmente el Pb con una concentración media de 213.8 mg/kg, muy superior a la concentración de efecto probable (PEC) de SQG. Las concentraciones de Pb y As en el sedimento que fueron extremadamente más altas que la PEC indican una toxicidad extrema y requieren un análisis de especiación adicional.

Según Navarrete-Rodríguez et al. (2020) el objetivo de ésta investigación fue analizar la concentración de Pb y Cd en sedimentos del sistema fluvial-lagunero-deltaico del río Palizada. Se determinó el índice de contaminación de estos metales. El Cd presentó la mayor concentración en los sitios de muestreo. Se identificó el enriquecimiento de metales pesados a través de la acumulación de Cd y Pb; dicho proceso fue evaluado a través del índice de geoacumulación (Igeo).

Los resultados de esta indicaron que la contaminación de estos elementos es principalmente de origen antropogénico. Por ello, es importante evaluar sus efectos letales en los organismos que habitan este sistema, lo que requiere la implementación de un monitoreo integral.

Por otro lado, Zhu et al. (2019) indica en su estudio que la contaminación de metales pesados en los sedimentos del Embalse de las Tres Gargantas (TGR) en China es cada vez más preocupante como un problema importante para la calidad del agua desde que opera el embalse. Metales antropogénicos de Cd, Cu y Pb que provenían principalmente de la extracción de minerales, la combustión de combustibles fósiles, la contaminación agrícola y la deposición atmosférica. El cadmio es un contaminante metálico importante en los sedimentos con un alto nivel de contaminación y riesgo ecológico potencial en la zona de estudio.

Asimismo, Kijowska-Strugala et al. (2020) estudiaron 19 metales (Cr, Co, Ni, Sr, As, Mg, Ba, Cs, Ga, Rb, U, V, Zn, Pb, Cu, Cd, Fe, Mn y Al) en sedimentos en tres ríos (Nahal Sansana, Nahal Revivim y Nahal Pura) en septiembre de 2016. Las muestras se tomaron de la capa superficial de sedimentos (hasta 10 cm) aguas arriba y abajo de los embalses. El Al, Fe y Mg representaron el 99% de todos los metales analizados. El sedimento del fondo de los embalses tenía concentraciones más altas de metales que los sedimentos aguas arriba y aguas abajo de los embalses.

En el estudio sobre metales pesados en la Presa de Tres Gargantas (TGR), según Lin et al. (2020), determinaron las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Cr y Cd en aguas superficiales y sedimentos de la TGR durante el periodo de almacenamiento (diciembre de 2015) y el período de extracción de agua (junio de 2016). Los niveles de contaminación de metales pesados en los sedimentos se consideraron “no contaminados” por Cr, “moderadamente contaminados” por Cu, Zn, Pb y “moderadamente contaminados” por Cd.

Miao et al. (2021) investigó ríos kársticos representativos en Liuzhou, China, para estudiar la relación entre las especiaciones de siete metales pesados en los sedimentos con su bioacumulación en peces nativos. Los resultados mostraron que los metales pesados en los sedimentos están todos por debajo de su límite de

exposición permisible (PEL), pero el Cd y el Zn son significativamente más altos que la línea base del suelo.

Según Kumar et al. (2021) en su investigación, recolectaron 45 muestras de sedimentos y quince muestras de agua del río Nakuvadra-Rakiraki, Fiji, China. analizaron para evaluar la distribución espacial, la contaminación y la fuente. Los resultados del factor de enriquecimiento, el índice de geoacumulación y el índice del factor de contaminación variaron espacialmente y la mayoría de las muestras de sedimentos estaban contaminadas con Pb, Mn y Cu. El riesgo ecológico potencial reconoció al Cd y al Pb como riesgos ecológicos y de salud pública para las comunidades aledañas.

Zhuang et al. (2021) investigó el contenido, la contaminación, el riesgo y la fuente de diez metales (metaloides) (As, Co, Pb, Cu, Ni, Cr, V, Mn, Ba y Zn) en el sedimento aguas arriba del río Danjiang, China, los resultados indicaron que los contenidos medios de los metales (metaloides) determinados excepto As en el sedimento excedieron sus valores de fondo correspondientes. Todos los metales (metaloides) determinados excepto As, Ni y Cr en el sedimento aguas arriba del río Danjing presentaron un cierto grado de contaminación. Se identificaron cuatro fuentes principales para los metales(metaloides): Cu, Ni, Mn y V que se originaron principalmente de fuentes agrícolas y naturales; As, Ba, Pb y Zn afectados por el tráfico y fuentes industriales. El Co se originó a partir de materiales de construcción y el Cr fue principalmente de origen natural.

Por otro lado, Miao et al. (2021) investigaron los ríos kársticos representativos en Liuzhou, China, para estudiar la relación entre las especiaciones de siete metales pesados en los sedimentos con su bioacumulación en peces nativos. Los resultados mostraron que los metales en los sedimentos están todos por debajo de su límite de exposición permisible (PEL), pero el Cd y el Zn son significativamente más altos que la línea base del suelo. Las concentraciones de la mayoría de los metales pesados en los peces están significativamente correlacionadas con los niveles en los sedimentos y, dados los coeficientes de correlación más altos para su fase unida al carbonato, se puede ver que esta fase juega un papel fundamental en la bioconversión de los metales pesados.

Asimismo, Zhao et al. (2021) investigaron las concentraciones de seis metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los sedimentos ribereños a lo largo del embalse de la presa Xiaolangdi (XLD) China y su tramo aguas abajo, y se investigó el nivel de contaminación y el riesgo ecológico potencial. La evaluación de contaminación y riesgo ecológico indicó que los sedimentos ribereños en el área de estudio estaban contaminados por los seis metales pesados, particularmente por Cd y Pb, que en general exhibían un riesgo ecológico alto y moderado, respectivamente. Las fuentes de Pb probablemente fueron insumos agrícolas, mientras que las fuentes de Cd deben atribuirse tanto a insumos industriales como agrícolas.

Por otro lado, Sani et al. (2022) estudiaron la bioacumulación y los riesgos para la salud de algunos metales pesados que incluyen Zn, Cd, Fe y Pb en peces (*Oreochromis niloticus*) con sus niveles en sedimentos y agua del río Challawa, Kano, Nigeria. Las cantidades de metales pesados en todas las muestras entre la estación seca y la lluviosa variaron significativamente ($p < 0.05$) con una relación positiva entre los metales en agua, peces y sedimentos. Fe se acumula más que Zn, Cd y Pb a partir de los valores de los factores de bioacumulación en sedimentos y agua del río Challawa.

Otro estudio sobre la concentración de metales pesados en sedimentos, lo realizó Hasimuna et al. (2021) quien investigó el nivel de algunos contaminantes de metales pesados en los ríos Kifubwa y Solwezi en la provincia noroccidental de Zambia. Utilizaron un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) para determinar los niveles de metales pesados en los sedimentos superficiales. Se tomaron muestras de seis sitios que se sabe que están asociados con actividades antropogénicas de metales pesados. En estos sitios, se identificaron y midieron seis elementos, como Cu, Co, Fe, Mn, Pb y Zn, en los sedimentos superficiales de estos dos ríos. Se determinaron el riesgo ecológico relacionado con la contaminación por metales pesados, calcularon el factor de contaminación (CF), el grado de contaminación (CD), así como el índice de carga de contaminación (PLI) para cada elemento en cada sitio en cada río. Estos índices mostraron poca contaminación en los sedimentos superficiales de estos ríos. Esto, por lo tanto, implica que hay pocos riesgos ecológicos que plantea la contaminación por

metales pesados a los ecosistemas de los ríos Solwezi y Kifubwa a partir de los sedimentos.

Según Apau et al. (2022) en su estudio, evaluaron el contenido de metales pesados en el sedimento del río Subin, así como las propiedades fisicoquímicas y la carga microbiana en el río. Se tomaron muestras de agua y sedimentos del río aguas arriba y aguas abajo. Se utilizaron el Índice de Geoacumulación (Igeo), el factor de contaminación (CF), el grado de contaminación (CD) y el índice de carga contaminante (PLI) para evaluar el nivel de enriquecimiento y contaminación de metales pesados en los sedimentos del río Subin. Los datos de Igeo sugirieron que el río estaba altamente contaminado por Ag y Cd y moderadamente contaminado por Pb y Co. Los resultados sugieren que el río Subin está altamente contaminado y, por lo tanto, necesita estrategias de gestión urgentes para mitigar el deterioro del río.

Según Xiao et al. (2021) indica que recolectaron 61 muestras de sedimentos a lo largo del río Lijiang, para determinar el nivel de contaminación y el riesgo ecológico que representan 10 metales pesados (Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, As, Hg y Cd) en sedimentos. Estos se evaluaron utilizando el índice de geoacumulación, el índice de riesgo ecológico potencial y el grado de contaminación modificado. Los resultados mostraron que las concentraciones medias de la mayoría de los metales excedieron sus valores de fondo correspondientes.

Según Proshad et al. (2022) estudió la acumulación de metales (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn) en los sedimentos del río Korotoa para determinar el contenido de metales, distribución, fuentes y sus posibles impactos ecológicos en el río. Encontró patrones espaciales significativos de concentración de metales tóxicos que representó el 45.2% de la variación espacial de aguas arriba y aguas abajo. Los contenidos de metal se compararon con los estándares de calidad del sedimento y se encontró que todas las concentraciones de metal estudiadas excedieron el Nivel de Efecto Umbral (TEL), mientras que Cr y Ni superaron los niveles de efecto probable. Todas las concentraciones de metales fueron superiores al valor promedio de (ASV), excepto Mn y Hg. Los modelos identificaron tres fuentes potenciales, es decir, fuente natural, emisión de tráfico

y contaminación industrial, que representaron el 50.32%, 20.16% y 29.51% respectivamente.

Por otro lado, Liang et al. (2023) realizó una investigación exhaustiva sobre la distribución y biodisponibilidad de metales pesados (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb) en sedimentos a lo largo de dos transectos típicos desde el río Yangtze en China. En el estudio indica que los metales pesados se asociaron principalmente con los sedimentos de grano fino (enriquecidos con materia orgánica), mostrando tendencias decrecientes desde los sitios cercanos a la costa hacia los de alta mar. La zona de máxima turbidez mostró las mayores concentraciones de metales, que se evaluaron como contaminados para algunos metales pesados (especialmente Cd) utilizando el índice de geoacumulación. Con base en el procedimiento de extracción secuencial BCR modificado, las fracciones no residuales de Cu, Zn y Pb fueron mayores dentro de la zona de máxima turbidez, respectivamente.

Del mismo modo, Liu et al. (2023) en su estudio determinó exhaustivamente la distribución espacial, fuentes, y los riesgos ecológicos de ocho metales pesados en 85 muestras de sedimentos superficiales en el estuario del río Yangtze (YR), el tercer río más largo del mundo. Los resultados revelaron que las concentraciones medias de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn en los sedimentos fueron 11.32, 0.57, 87.31, 37.39, 0.10, 34.97, 32.27 y 108.38 mg/kg, respectivamente. La evaluación de la contaminación reveló que el Cd y el Hg estaban significativamente superior a otros metales pesados. El Cd tuvo una variación espacial significativa, con mayor concentración en sedimentos fluviales que en sedimentos estuarinos. Reveló que las actividades antropogénicas tenían la mayor contribución a la ocurrencia de metales pesados (78.53%), incluyendo actividades industriales, transporte marítimo y producción agrícola. El área ribereña tenía un riesgo ecológico significativamente mayor de metales que la zona estuarina por su densa industrialización. El autor indica que, este trabajo se puede utilizar como una guía para ayudar al gobierno prevenga y controle eficientemente la contaminación por metales pesados de los sedimentos en el área de estudio y otras áreas similares.

Del mismo modo, Xie et al. (2023) en su artículo analiza el nivel de contenido, los cambios temporales y espaciales y las posibles tendencias de riesgo ecológico de los contaminantes de metales pesados en los sedimentos superficiales de 2015

a 2020. Los resultados mostraron que los contenidos promedio de Cu, Pb, Mn, As y Hg en los sedimentos a lo largo del río Yangtze China, fueron 23.20~50.30 mg/kg, 19.60~65.70 mg/kg, 154.30~996.80 mg/kg, 6.98~20.65 mg/kg, 0.198~0.492 mg/kg, respectivamente. El contenido medio de Cu, Pb, Mn, As y Hg en los sedimentos de sus afluentes fue 22.30~29.50 mg/kg, 15.30~36.70 mg/kg, 456.30~1123.40 mg/kg, 7.37~17.15 mg/kg, 0.209~0.345 mg/kg, respectivamente. Había diferencias obvias en el contenido de metales pesados en la superficie de sedimentos de las orillas izquierda y derecha de las secciones locales a lo largo del río Yangtze. El contenido de metales pesados en los sedimentos superficiales a lo largo del río y sus afluentes fluctuaron hasta cierto punto en diferentes períodos. El índice de riesgo ecológico potencial de los metales pesados, excepto el río Ganjiang, cambia poco durante la mayoría de los períodos. El índice de riesgo ecológico potencial de los metales pesados en el río Ganjiang estuvo en un nivel relativamente alto en 2017, pero disminuyó y tendió a estabilizarse después de 2017.

Por último, Zhou et al. (2023) indica que, una comprensión predictiva de las cargas de metales pesados en una cuenca hidrográfica y su identificación de la fuente (p. ej., fuentes puntuales y difusas) y la dinámica de metales pesados en los ríos es esencial para mitigar la contaminación del río y desarrollar estrategias eficaces de gestión de cuencas fluviales. El desarrollo de tales estrategias requiere un monitoreo adecuado y modelos integrales basados en una sólida comprensión científica del sistema de cuencas. Sin embargo, falta una revisión exhaustiva de los estudios existentes sobre el destino de metales pesados a escala de cuenca y el modelo de transporte.

A nivel nacional

En el caso del Perú se tiene algunos trabajos de investigación referidos al tema, sin embargo, son escasos y puntuales; entre ellos tenemos:

En el trabajo de investigación sobre dispersión secundaria de los metales pesados en sedimentos de los ríos Chillón, Rímac y Lurín del departamento de Lima, en el estudio indica que se ha determinado en el río Rímac que hay altos niveles de abundancia de Zn, Pb, As, W, Sn, Fe, Sb, Mo, Cd; en el río Chillón hay Cu, Ni, Hg y en el río Lurín, Cr. Además, manifiesta comparando con los niveles

establecidos en normas internacionales, el río Rímac está contaminado con As, Cu, Hg, Zn, y Sb, en el río Chillón As, Sn, Hg; y en el río Lurín, sólo en As (Rivera et al., 2007).

En el estudio sobre el análisis correlacional y evolutivo de los metales pesados en sedimentos del río Santa entre Huaraz – Carhuaz, departamento de Ancash, donde se analizó catorce metales pesados en sedimentos de quebradas en un sector del río Santa, donde se demostró que los metales que tienen una distribución normal son Cr-Cu-Mo-Pb-V y distribución lognormal As-Cd-Fe-Hg-Ni-Sb-Sn-W-Zn. La abundancia media muestra que el Zn es el metal más abundante y el Hg se presenta en pequeñas cantidades. Comparando con los límites establecidos para suelos en la Tabla Holandesa, los metales pesados en los sedimentos en este sector del río Santa, que sobrepasan los límites de intervención son el Ar, Pb y Zn (Rivera & Chira, 2008)

En otro estudio sobre la determinación de metales pesados en sedimentos del río Chillón mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, entre sus conclusiones manifiesta que se han analizado 15 muestras de sedimentos de río Chillón, en los que se han determinado niveles de abundancia de elementos como el Zn, Cu, Pb, Sr, etc. El estudio indica además que el elemento con mayor concentración es el Zn con 199 ppm, que supera conforme a los elementos y niveles establecidos en la tabla de legislación ambiental internacional. Además, indica que existe importante concentración de plomo en dicho río (Chui et al., 2009).

En otro estudio sobre el contenido de metales pesados en agua y sedimento en el río Bajo Nanay de Iquitos; entre sus conclusiones indica que se hizo la evaluación de la concentración de metales pesados en agua y mercurio en sedimentos del río Nanay, realizaron el muestreo desde el caserío Libertad, hasta su desembocadura en el río Amazonas, en las épocas de avenida y seca del año 2011, además indica que el río abastece al sistema de abastecimiento de agua potable a varios poblados de la zona. Según los resultados de análisis de sedimentos, hay la presencia de Hg altas concentraciones de 1,636 ppm en época de avenida y 3.03 ppm en época seca (Sotero-solís & Alva-astudillo, 2013).

En el año 2014 publicaron la investigación denominada “*Heavy metal and metalloids intake risk assessment in the diet of a rural population living near a gold mine in the Peruvian Andes (Cajamarca)*”. En este estudio evalúa la composición de la dieta de una población rural cerca de una mina de oro en el distrito de Cajamarca y cuáles eran las concentraciones de As, Cd, Hg, Pb, Zn, Al, Cr y Cu en agua potable y en las muestras de alimentos. El estudio demuestra que las ingestas diarias de As, Cd y Pb excedieron los valores límite establecidos por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, en inglés), que conlleva serias preocupaciones por la salud de la población, se demostró que los valores de ingesta de As y Pb fueron más altos (Barenys et al., 2014).

Otro estudio muy reciente realizado en el Perú denominado “*Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon*” en el año 2020, trata sobre la evaluación del grado de contaminación por metales pesados en el suelo en áreas donde se realizó las operaciones mineras luego de ser abandonadas por la minería aluvial de oro en la Región de Madre de Dios. El estudio concluye que todos los metales pesados, estaban por debajo de los niveles permitidos de acuerdo con los valores de Estándar de Calidad Ambiental para suelo del Perú y normas de calidad de suelos de Canadá, para los metales como As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn. No se detectó Hg en ninguno de los sitios evaluados; las bajas concentraciones de metales pesados (principalmente Hg) en la zona de la mina podrían explicarse debido a la intensa volatilización, capacidad de retención de metal debido a la arcilla y materia orgánica contenida y por procesos de lixiviación en el suelo (Velásquez Ramírez et al., 2020).

A nivel local

A nivel local, existen muy pocos estudios referidos al tema en específico; sin embargo, consideramos como ámbito local a la vertiente del Titicaca que incluye los estudios realizados en Bolivia, así como en Perú y geográficamente vierten las aguas pluviales hacia el Lago Titicaca.

Entre estos trabajos tenemos, el estudio sobre la contaminación de aguas y sedimentos por As, Pb y Hg de la cuenca del río Ramis, realizado en el año 2009 por Olarte y Pacheco Tanaka (2009) indica que la actividad minera mediana y artesanal en las cabeceras de la cuenca del Ramis, ocasiona el deterioro y

alteración progresiva de la flora y fauna ribereña, generando un efecto negativo en la actividad socioeconómica de la población. El estudio abarcó tres subcuencas: Azángaro, Ayaviri y Ramis. Los parámetros elegidos fueron (As, Hg y Pb). Los análisis de agua reportaron concentraciones por encima de los Estándares de Calidad Ambiental para el agua (ECA-agua) de As y Pb. Así mismo, en sedimentos se reportó concentraciones por encima de los límites permitidos (USEPA-USA) como As, Hg y Pb. Del mismo modo manifiesta que estas variaciones son producto del uso desmedido de mercurio en recuperación del oro en La Rinconada y Ananea, que generan además, grandes cantidades de sólidos en suspensión y como consecuencia sedimentos superficiales (Olarde & Pacheco Tanaka, 2009)

Por otro lado, el estudio referido a las concentraciones de mercurio en peces, de las aguas y sedimentos en el río Ramis afluente del lago Titicaca, Perú, informa que la concentración de mercurio en el tejido muscular de varias variedades de peces del lago Titicaca, incluyendo el pejerrey (*Basilichthyes bonariensis*), el carachi (*Orestias*), y dos tipos de bagre indígena (*Trichomycterus*). Indica que el 27% en pejerrey y 75% en carachi superaron el criterio de calidad en tejidos de peces según la norma EPA. Los niveles de mercurio en el pejerrey aumentaron con el tamaño de los peces, aunque esta relación fue menos evidente para la especie Carachi. Además, concluye en el estudio que se realizó un muestreo sinóptico del río Ramis en un intento de determinar si las emisiones de mercurio de la minería de oro artesanal podrían ser una importante fuente de contaminación por Hg en el Lago Titicaca. Aunque las concentraciones altamente elevadas de Hg y otros metales pesados fueron documentados en corrientes de agua de cabecera cerca de los centros mineros de La Rinconada y Cecilia, la cantidad de Hg que entró al lago Titicaca que podría atribuirse a la minería en la cuenca Ramis estaba por debajo del límite cuantificable en un estudio de julio de 2002. En el trabajo recomiendan estudios adicionales de la dinámica del mercurio en el Lago Titicaca, así como en los ríos que drenan hacia el lago (Gammons et al., 2006).

Otro estudio muy importante y de reciente publicación es referido a la concentración de metales en agua, sedimentos y cuatro especies de peces del lago Titicaca, manifiesta en el estudio una preocupación ambiental a escala mundial,

por cuanto la actividad minera intensiva y la descarga de aguas residuales urbanas son fuentes importantes de insumos metálicos para el lago Titicaca, el riesgo que representa la contaminación de los metales a la vida silvestre y las poblaciones humanas ha sido poco estudiado. En el trabajo refiere que hicieron comparaciones de las concentraciones de Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Co y Fe en agua, sedimento y dos tejidos (hígado y músculo) de cuatro especies de peces (*Odontesthes bonariensis*, *Orestias luteus*, *Orestias agassii* y *Trichomycterus Rivulatus*) a través de áreas pesqueras importantes en el Lago Titicaca. La concentración de Pb en agua en los sitios de descarga de los principales ríos y la mayoría de los elementos, con excepción de Co y Fe superaron los límites establecidos, además manifiestan que en todos los peces recogidos en este estudio superado los umbrales de seguridad establecidos por la legislación internacional. Las mayores concentraciones de metales en especies bentopelágicas fueron en el tejido como el principal depósito para todos los metales, con excepción de mercurio. El patrón de bioacumulación del metal en los peces se relacionó débilmente con las concentraciones en el ambiente con la excepción del Hg en el lugar más contaminado. A medida que la contaminación de los metales se extendía. Se detectaron altas concentraciones de metales en las cuatro especies de peces. El estudio alerta que las autoridades deben hacer cumplir la legislación con respecto a la calidad de agua para consumo humano y evaluar los efectos de la contaminación de los metales en la salud de los peces (Monroy et al., 2014).

Otro estudio sobre Lago Titicaca es referido a impactos de las actividades antropogénicas en la contaminación de la cuenca del lago Titicaca, hecho en la cuenca Katari de la República de Bolivia. El estudio concluye que la liberación de aguas residuales en los sistemas fluviales tiene un gran impacto en la calidad del agua como nutriente, especialmente el fosfato, excede en gran medida los valores permitidos, lo que constituye agua de mala calidad. Indicadores como el Mn disuelto y el agotamiento de Fe y oxígeno muestran que las aguas son eutróficas. El estado trófico de bahía de Cohana dentro del lago Titicaca es gracias a la planta nativa *Schoenoplectus tatora*, comúnmente conocida como la “totora”, que crece en la Bahía de Cohana, es importante la presencia de esta planta por eliminar nutrientes como el fósforo y el nitrógeno de los efluentes. Otro impacto importante es la liberación de aguas residuales con presencia de antibióticos, especialmente

SMX, con concentraciones superiores a lo permitido. Esto conduce a la resistencia bacteriana a los antibióticos en todos los puntos muestreados. Existe presencia de Sn aguas arriba por la presencia de la actividad minera, antes de la descarga de los efluentes de la ciudad de El Alto. Las concentraciones disueltas de otros elementos metálicos (Cd, Zn y Ni) son altas aguas arriba de la cuenca, pero disminuyen río abajo porque absorben los sedimentos suspendidos (Duwig et al., 2014).

En el estudio sobre metales en sedimentos superficiales de la bahía interior de Puno, Lago Titicaca-Perú; fueron analizadas las concentraciones de Cu, Zn, Pb, Cd, As y Hg en los sedimentos superficiales de seis estaciones de muestreo ambiental seleccionadas de enero a noviembre del 2016. Al comparar los resultados con la norma ISQG de CCME de Canadá, todos los elementos presentaron concentraciones en los rangos recomendados. Concluye que, los sedimentos superficiales de la bahía interior de Puno, no representan riesgo por exposición a metales totales, ya que sus concentraciones se encontraron en el rango de los valores permisibles (Moreno Terrazas et al., 2018).

Entre las tesis doctorales de la Escuela de Posgrado de la UNA Puno; se tiene lo siguiente documentos:

- Estudio sobre la cuantificación de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Al, As, Ba y Hg) presentes en las macrófitas acuáticas de los principales ríos tributarios del lago Titicaca. La biomasa de las macrófitas evaluadas (*E. potamogeton*, *M. elatinoides* y *P. strictus*) no están catalogadas como hiperacumuladoras de metales pesados. Los metales Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Hg presentes en las macrófitas *M. elatinoides* y *P. strictus* no superan los niveles permisibles, mientras que Mn, Al, As, Zn y Hg superan los niveles de 0.1 mg/kg (Carpio, 2016).
- La investigación sobre la evaluación de riesgo ambiental en el área de influencia minera del río Crucero por plomo y mercurio – distrito de Ananea, consistió en la toma de muestras de agua y sedimento; para sedimentos los resultados de concentraciones de Hg en setiembre-2015, fue entre 0.33 a 0.86 mg/kg y para marzo 2016 fue entre 0.16 a 0.40 mg/kg. En el caso de Pb para

setiembre 2015 fue entre 20 a 55 mg/kg y para marzo 2016 fue entre 17 a 30 mg/kg, respectivamente (Pérez, 2017).

- Determinaron las concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo en pastos, fibra, carne y vísceras de alpacas criadas en ámbitos de actividad minera de Ananea, se recolectaron muestras de pasto en zonas de pastoreo, fibra del costillar medio, la carne y vísceras de animales beneficiadas. Los metales pesados encontrados en el pasto fueron Hg, Cd y As respectivamente; en la fibra de alpaca se encontró Hg, Cd, Ar y Pb. Además, se encontraron Cd y Hg en hueso, muslo, pulmón, riñón e hígado de las alpacas, sin embargo, los niveles de Hg y Cd en músculos y vísceras de alpacas no superan los límites máximos permisibles, según normas internacionales alimentarias (Huanqui, 2018).

En conclusión, los estudios revisados indican al menos en la cuenca del lago Titicaca hay la presencia de concentraciones importantes de metales pesados en los sedimentos y por consiguiente preocupa sobre el ingreso de estos metales a la cadena trófica acuática y luego llegar a la dieta de las personas, lo que justifica el objetivo del presente estudio.

1.2.2 Normatividad internacional sobre calidad de sedimentos

Respecto a las normas que regula la calidad de sedimentos en cuerpos de aguas superficiales continentales, existe varias regulaciones; al respecto se ha revisado las normas de diferentes países a nivel mundial que cuentan con sus respectivas regulaciones.

En las Tablas 2, 3 y 4 se agrupa las categorías de los valores de concentración de los metales pesados en sedimentos que tiene diferentes efectos en los ecosistemas de agua dulce de los diferentes países.

Tabla 2

Valores de efecto bajo (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)

SQG	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Referencia
LEL	6.00	0.60	26.0	16.0	0.200	16.0	31.0	120	(Persaud and Jaagumagi, 1993)
TEL	5.90	0.60	37.3	35.7	0.174	18.0	35.0	123	(Smith et al., 1996)
TEC	9.79	0.99	43.4	31.6	0.180	22.7	35.8	121	(MacDonald et al., 2000)
EPA de EE.UU.			< 25	< 25		< 20	< 40	< 90	(Ben Salem et al., 2014)
NOAA Fija: LEL	6.00	0.60	26.0	16.0	0.200	16.0	31.0	120	(Buchman, 2008)
NOAA Fija: TEL	5.90	0.60	37.3	35.7	0.174	18.0	35.0	123	(Buchman, 2008)
NOAA Fija: TEC	9.79	0.99	43.4	31.6	0.180	22.7	35.8	121	(Buchman, 2008)
NEL (Italia)	7.24	0.68	52.3	18.7	0.130	15.9	30.2	124	(Apitz et al., 2007)
MSQS (China)	20.0	0.50	80.0	35.0			60.0	150	(Xu et al., 2017)
QRVs (Brasil)	5.90	0.60	37.3	35.7	0.170	18.0	35.0	123	(Cervi & Poletto, 2018)

Nota:

LEL: Lowest Effect Level; Nivel de Efecto más Bajo.

TEL: Theshold Effect Level; Nivel de Efecto Umbral.

TEC: Threshold Effect Concetration. Consensus Basec; Valores de Consenso.

EPA: Environmental Protection Agency de EE.UU. Fija: **Not polluted**.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU. fija: **LEL**.

NEL: No Effects Lagoon Venecia Italia; Ministerio Ambiente. Fija Venice limite **Clase A**.

MSQS: Marine Sediment Quality Standards (GB 18668-2002) Fija: **MSQ-1** China.

QRVs: Quality Reference Values. Resol. N° 454/2012 fija **Level 1**. Brasil.

Tabla 3

Valores de Efecto Medio (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)

SQG	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Referencia
SEL	33	10.00	110	110	2.000	75.0	250.0	820	(Persaud and Jaagumagi, 1993)
PEL	17	3.53	90	197	0.486	36.0	91.3	315	(Smith et al., 1996)
PEC	33	4.98	111	149	1.060	48.6	128.0	459	(MacDonald et al., 2000)
EPA de EE.UU.			25-75	25-50		20-50	40-60	90-200	(Ben Salem et al., 2014)
NOAA Fija: SEL	33	10.00	110	110	2.000	75.0	250.0	820	(Buchman, 2008)
NOAA Fija: PEL	17	3.53	90	197	0.486	36.0	91.3	315	(Buchman, 2008)
NOAA Fija: PEC	33	4.98	111	149	1.060	48.6	128.0	459	(Buchman, 2008)
PEL (Italia)	25	5.00	100	50	2.000	50.0	100.0	400	(Apitz et al., 2007)
QRVs (Brasil)	17	3.50	90	197	0.486	35.9	91.3	315	(Cervi & Poletto, 2018)

Nota:

SEL: Severe Effect Level; Probable Efecto Severo.

PEL: Probable Effect Level; Nivel de Efecto Probable.

PEC: Probable Effect Concentration. Consensus Basec. Valores de Consenso.

EPA: Environmental Protection Agency de EE.UU. (2002) Fija: **Moderately polluted**

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU. Fija: **SEL.**

PEL: Probable Effects Lagoon Venecia Italia: Ministerio Ambiente (1993) fija limite **Clase B.**

QRVs: Quality Reference Values. Resol. N° 454/2012 fija **Level 2.** Brasil.

Tabla 4

Valores de Efecto Extremo (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)

SQG	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Referencia
EEL (Italia)	50.00	20.00	500	400	10.0	150.0	500.0	3000	(Apitz et al., 2007)
EPA de EE.UU.		> 6	> 75	> 50		> 50	> 60	> 200	(Ben Salem et al., 2014)
MSQS (China)	93.00	5.00	270	200			250.0	600	(Xu et al., 2017)

Nota:

EEL: Extreme Effects Lagoon Venecia Italia, Ministerio Ambiente. Fija **Clase C.**

EPA: Environmental Protection Agency de EE.UU. Fija: **Heavily polluted**

MSQS: Marine Sediment Quality Standards (GB 18668-2002) CSBTS Fija: **MSQ-3** (China):

1.2.3 Normatividad nacional sobre calidad de sedimentos

En el Perú ya se fijaron los valores de Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para los diferentes parámetros de la calidad de agua, aire, suelo, ruido y radiaciones no ionizantes. Sin embargo, no existe aún valores de ECA sedimentos o valores de Directrices de calidad de sedimentos en ecosistemas de agua dulce o continentales, tal como existe en Canadá y EE.UU. denominado Sediment Quality Guidelines (SQGs).

Por otro lado, nuestro país se caracteriza por una dinámica económica basado en la actividad extractiva como es la minería fundamentalmente y estas actividades se ubican en su mayoría en las partes altas de las cuencas de los andes, cuyos residuos líquidos, sólidos (sedimentos) descargan en su gran mayoría a los cursos de aguas superficiales. En el recorrido arrastra sedimentos que contiene sin duda metales pesados que son tóxicos o dañinos para el ser humano y los ecosistemas de los ríos y lagos que se encuentra en la parte media y baja de las cuencas.

Por ello resulta de vital importancia la propuesta de establecer dichos valores con el fin de vigilar la calidad de los sedimentos de los ríos y lagos del Perú; con el fin de preservar la calidad de los ecosistemas de agua dulce y la salud de las personas. Se tiene fijado esos valores en algunos países del mundo, principalmente en Norteamérica y algunos países de Europa; sin embargo, en Sudamérica, el único país que tiene establecido esas normas es Brasil, con base en los valores establecidos por Canadá.

Para el presente estudio, con fines de comparar las concentraciones de metales pesados en las diferentes muestras tomadas, la norma corresponde al país de Canadá denominado *SQG*, siendo estos dos valores de mayor uso para las comparaciones de los diferentes artículos de relevancia científica. Los valores establecidos en dicha norma son las siguientes (Tabla 5).

Tabla 5

Valores de concentración de metales pesados en sedimentos (mg/kg d.w.) de SQG (Sediment Quality Guidelines)

SQG	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Referencia
TEC	9.79	0.99	43.4	31.6	0.180	22.7	35.8	121	(MacDonald et al., 2000)
PEC	33	4.98	111	149	1.060	48.6	128	459	(MacDonald et al., 2000)

Definiciones (MacDonald et al., 2000):

- **TEC:** Threshold Effect Concentration (Concentración Límite de Efecto), Cuando la concentración está por debajo de este valor, rara vez ocurrirá los efectos biológicos adversos.
- **PEC:** Probable Effect Concentration (Concentración de Probable Efecto), Cuando la concentración excede este valor, con frecuencia ocurrirá los efectos biológicos adversos.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

La cuenca del río Ramis es la cuenca más extensa de la cuenca del Lago Titicaca que a su vez abarca dos cuencas como Azángaro y Pucará, donde existen diferentes actividades económicas y sociales de los habitantes. En la cuenca Azángaro, sus ríos nacen de las partes altas como la quebrada Cerro Lunar y en la laguna Rinconada (donde está la mina Rinconada y Ananea), posteriormente toma el nombre de río Grande, luego Crucero, Azángaro atravesando diferentes centros poblados y ciudades. Por el otro lado, en la cuenca Pucará nace en su parte alta el río Pataqueña y Azufrine (donde se ubica la mina Aruntani) formando los ríos Chacapalca, Llallimayo, Ayaviri y Pucará. Finalmente, estos dos ríos Azángaro y Pucará forman el río Ramis, que desemboca en el lago Titicaca. En sus cauces estos ríos son depósitos de sedimentos que contiene metales pesados; sin embargo, no se sabe cuál es la concentración de dichos metales en esos sedimentos, ni se sabe donde existe más concentración que los demás y si cumple con los valores de concentración permitidos por las normas internacionales o nacionales.

Revisando los pocos documentos que existe en la literatura científica respecto los estudios sobre metales pesados en sedimentos en el área de estudio, algunos indican, que existe concentraciones excesivas de As, Hg, Cd, Zn, siendo estos estudios puntuales y esporádicos, lo cual no ayuda a conocer en forma integral la variación espacial y temporal de la concentración de estos metales en sedimentos en nuestra zona de estudio.

Por otro lado, en el Perú, ya se tiene fijado los valores de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, aire, suelo y ruido; sin embargo, aún no se tiene los

valores de ECA para sedimentos. Estos valores de ECA-sedimentos es necesario para realizar el monitoreo de la calidad de los sedimentos, y evaluar si cumplen o no los niveles de concentración de estos parámetros para conserva la vida de estos ecosistemas acuáticos de agua dulce como ríos y lagos. En el Perú al no contar con una norma legal sobre ECA-sedimentos, no se puede evaluar ni fiscalizar la calidad de los sedimentos de las cuencas del país y en particular del área de influencia de las actividades extractivas, productivas y de servicios y el grado de contaminación de los mismos.

Sin embargo, a nivel internacional existen normas oficiales como Directrices de la calidad de sedimentos (por sus siglas en inglés, Sediment Quality Guidelines SQGs) de Canadá, así como normas establecidas por Agencia de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés EPA, Environmental Protection Agency) de los EE.UU., así como de algunos países. Sin embargo, en el caso de Perú, muchas de las evaluaciones y fiscalizaciones no se realizan por falta de esta norma en forma explícita para su cumplimiento.

En este sentido, resulta fundamental hacer un estudio integral para conocer la concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes cauces de los ríos afluentes de la cuenca del río Ramis y una evaluación comparativa a nivel de las subcuencas donde existe actividades económicas (principalmente la minería) con la normativa establecida en Canadá, evaluar el riesgo ecológico de la concentración de los metales pesados en sedimentos en estos cuerpos de ecosistemas acuáticos, además se requiere conocer la variación espacial de la concentración de las mismas, con el fin de identificar las zonas críticas con el presente estudio.

Además, se generará una base de datos (línea de base) como referencia para los estudios posteriores con fines de vigilancia y monitoreo por organismos fiscalizadores como ANA (Autoridad Nacional del Agua), OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental) o estudios específicos, tal como viene haciendo el país de China con sus ríos y lagos a nivel nacional, donde cuentan con cientos de estudios científicos publicado en ScienceDirect y Scopus, respectivamente.

2.2 Enunciados del problema

2.2.1 Problema general

¿Cómo es la variación espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en los afluentes de la cuenca del río Ramis – Puno?

2.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el nivel de concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis – Puno?
- ¿Cuál es la calidad de sedimentos evaluados a través de los diferentes índices de contaminación y su comparación con los valores de Estándar de Calidad Ambiental para sedimentos de normas internacionales?
- ¿Existe variación espacial significativa de concentración de metales pesados como As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Ni y Zn en sedimentos de los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis?

2.3 Justificación

Los sedimentos son depósitos que alberga entre otros compuestos inorgánicos y orgánicos, entre ellos los metales pesados; sin embargo, estos metales tienden a ser biodisponibles y ser absorbidos por el fitoplancton, luego pasa a zooplancton y posteriores en peces y finalmente ingresa por la dieta al ser humano.

Números estudios indican esta vía de ingreso de los contaminantes, y no es nada nuevo, las investigaciones científicas vienen demostrando los efectos en los ecosistemas acuáticos y salud de las personas. Sin embargo, en la zona de estudio, no se tiene estudios científicos integrales de la real concentración de estos elementos en sedimentos, no hay organismos públicos o privados que realicen monitoreos permanentes, ANA por el momento viene haciendo monitoreo de la calidad del agua, en algunos puntos, agrega monitoreo de la calidad de sedimentos, sin embargo, es insuficiente estos monitoreos.

En esta dirección la presencia de contaminantes en los sedimentos en los cauces de los ríos que son arrastrados por las aguas contiene metales pesados productos de la actividad minera, sea esta legal o ilegal; industrial, agrícola o poblacional en diferentes concentraciones; sin embargo, el problema de la contaminación del agua y sedimentos va más allá de esa percepción. A pesar de que algunos metales

son esenciales para los seres vivos; sin embargo, en altos niveles de concentración provocan efectos dañinos a la salud humana, así como a la flora y fauna. Debido a su alto potencial tóxico, son considerados como contaminantes altamente peligrosos por los organismos internacionales como la OMS (Organización Mundial de la Salud).

Por otro lado, hay escasa referencia bibliográfica respecto a estudios sobre metales pesados en sedimentos en el Perú y particularmente es muy pocos en la zona de estudio. Existen estudios aislados, esporádicos, pero lo fundamental, es que no cuenta con rigurosidad científica, lo que dificulta hacer un análisis de la realidad de la calidad de los sedimentos en la cuenca del río Ramis. Cabe resaltar que la cuenca cuenta con una superficie de aproximadamente 14,372 km² que tiene más de 61 ríos que agrupados en sus dos ríos principales como Azángaro y Ayaviri; además, resulta ser todo un ecosistema que sin duda hay variación de la concentración de los metales pesados en sedimentos en diferentes puntos.

Además, resulta vital tener una información de línea de base referencial sobre la concentración de metales pesados en sedimentos en sus ríos (al menos los más principales por el momento); por cuanto, es una de las cuencas con mayor intervención de actividades económicas principalmente extractivas como la minería y siendo una de las cuencas más importantes de la vertiente del Titicaca.

Como claro ejemplo se puede mencionar el país de China, ellos hacen estudios científicos en forma periódica y permanente sobre la calidad de sus sedimentos; solo mencionar uno, en el año 2015 publican que recolectaron un total de 4,654 muestras de sedimentos superficiales y 1,047 sedimentos profundos en más de 150 lagos, lo que representa un área total de 18,616 km². Durante los años 2004–2007, estudiaron todos sus ríos y sus tributarios en forma permanente. Para completar, otro ejemplo son los estudios que se realizan en la presa de las Tres Gargantas (Three Gorges Reservoir TGR en inglés) en el río Yangtze es el proyecto hidroeléctrico más grande del mundo. Las aguas del embalse y sus áreas marginales cubren un área total de 58,000 km² e incluyen 20 condados (ciudades) donde realizaron estudios científicos sobre la concentración de metales pesados en agua, sedimentos, biota y personas en forma periódica, creando una base

científica que publicaron en promedio seis artículos por año en revistas indexadas como Web of Science, aparte de las revistas propias de China. Esto realmente, nos demuestra que tan importante es conocer la calidad de nuestro ambiente, que fundamente los ecosistemas acuáticos que alberga una diversidad de especies que viven en ella.

Entonces, solo queda preguntarnos, ¿es necesario conocer la calidad de los sedimentos en los ríos y lagos del Perú, en particular en la cuenca del río Ramis?, teniendo en cuenta que, en la parte alta existen actividades económicas como la minería sin control. Y, por otro lado, conocer los puntos de mayor concentración de metales pesados en los cauces de los ríos afluentes del río Ramis y que debe ser identificados como zonas críticas que contribuyan a la toma las acciones de remediación en un futuro próximo.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- Realizar la evaluación espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos, mediante indicadores de la calidad de los sedimentos e identificar las zonas críticas de riesgo ambiental en los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis – Puno.

2.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el nivel de concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo de afluentes de la cuenca del río Ramis-Puno.
- Evaluar la calidad de sedimentos a través de los diferentes índices de contaminación y su comparación con los valores de Estándar de Calidad Ambiental para sedimentos de normas internacionales.
- Evaluar la variación espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo de los afluentes de la cuenca del río Ramis, con fines de identificar las zonas de alto riesgo ambiental en ecosistemas acuáticos.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- Las concentraciones de metales pesados en los diferentes puntos de muestreo son diferentes, la mayor concentración se encuentra en las zonas críticas que está directamente relacionado con la mayor actividad económica como la minería, existe variación espacial en la concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo en los afluentes de la cuenca del río Ramis – Puno.

2.5.2 Hipótesis específicas

- Las concentraciones de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo son diferentes en espacio en la cuenca del río Ramis.
- Las evaluaciones de la calidad de los sedimentos son diferentes en los puntos de muestreo y superan los valores de concentración establecidas en las normas internacionales.
- Existe variación espacial de concentración de metales pesados en sedimentos, presentando las zonas críticas en la cuenca del río Ramis – Puno.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

Los puntos de muestreo de sedimentos fueron ubicados dentro de la cuenca del río Ramis, cuya superficie total es de 14,372 km². Está conformada por dos ríos principales, Azángaro y Pucará, que confluyen en la parte baja y forman el río Ramis. La cuenca tiene 61 afluentes o tributarios que forma el sistema de red de drenaje fluvial (ANA, 2017), ver Figura 3.

La cuenca del río Ramis se ubica entre las coordenadas UTM, Norte: 8292921.24 a 8445421.24 m. y Este: 271841.52 a 454231.52 m. y tiene una variación altitudinal de 3808 a 5694 msnm. Hidrográficamente, pertenece a la cuenca del lago Titicaca (ANA, 2017).

3.2 Población

Cuenca Pucará (UH 018)

Tiene un área de 2,668.36 km² y un perímetro de 297.75 km. La parte más elevada está en la cota 5,100 m.s.n.m., en el cerro Sapansalla, y su parte más baja se ubica en la cota 3,825 m.s.n.m., en la confluencia con el río Azángaro. La longitud total del río principal es de 152.24 km, con una pendiente media de 0.0003%. El río de la cuenca es de orden seis. Sus principales ríos son el Azufrini, Pataqueña, Chacapalca, Ocuvi, Llallimayo, Macarimayo, Santa Rosa, Ayaviri y Pucará, para unirse al río Azángaro, respectivamente.

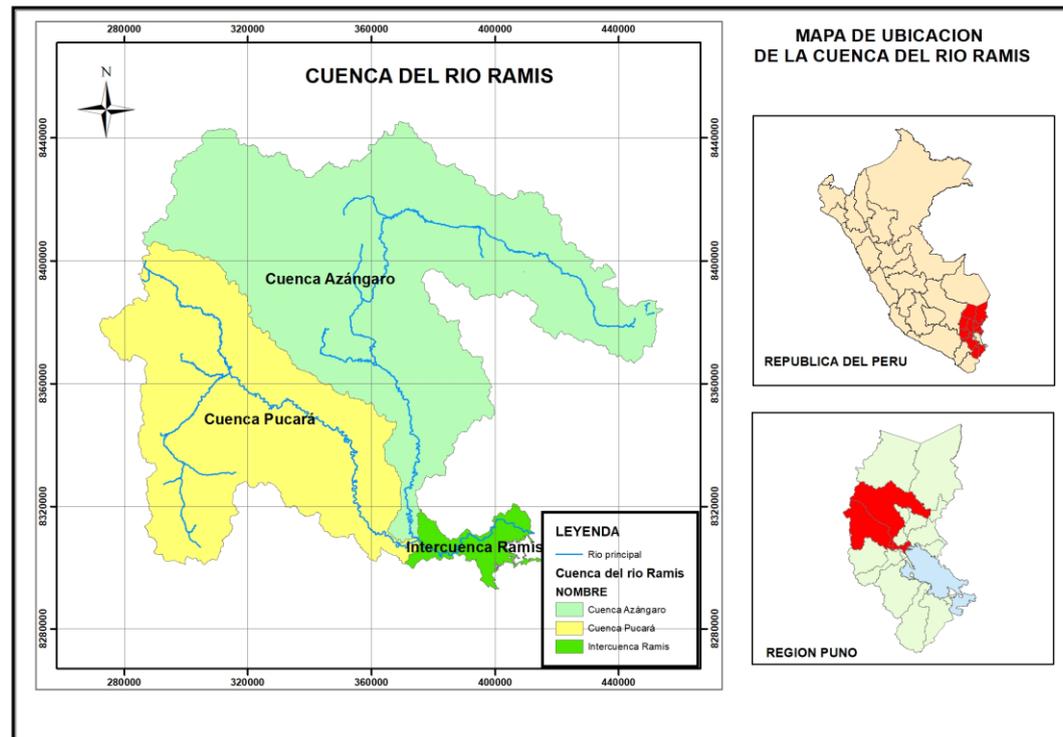


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

Cuenca Azángaro (UH 019)

Tiene una superficie de 676.41 km² y un perímetro de 177.14 km. La zona más alta está en la cota 4,560 m.s.n.m. y se ubica en el cerro Viluyo, y su parte más baja está en la cota 3,825 m.s.n.m., donde confluye con el río Pucará para formar el río Ramis. La longitud total del río principal es de 94.28 km y su pendiente media es de 0.0002%. Los ríos principales son Rinconada, Ananea, río Grande, Crucero, Antauta, San Antón, Larimayo, río Grande y Azángaro, para unirse al río Pucará, respectivamente.

Intercuenca Ramis (UH 0179)

Tiene un área de 1,575.11 km², su parte más elevada está en la cota 4,750 m.s.n.m. en el cerro Ticllacocha y su parte más baja se ubica en la cota 3,808 m.s.n.m. donde el río Ramis desemboca al lago Titicaca. Este sector es básicamente un cauce de conducción de los ríos Azángaro y Pucará. La longitud total del río principal (Ramis) es de 60.15 km. que presenta una pendiente media de 0.05%, respectivamente.

3.3 Muestra

En la toma de muestra se siguieron estrictamente los procedimientos establecidos en el protocolo de muestreo de sedimentos *Sediment Sampling de EPA* en el que describen procedimientos, métodos y consideraciones generales y específicos que utilizaran para recolectar muestras de sedimentos para su evaluación de campo o análisis en laboratorio.

Se identificaron 26 puntos de muestreo, en cada uno de ellos se tomó una muestra de sedimentos, registrando sus coordenadas UTM, altitud y la descripción del punto de muestreo (Tabla 6).

El código ha sido designado siguiendo el procedimiento establecido en el Protocolo Nacional para el Monitoreo de calidad de Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016).

En el **Anexo 1** se encuentra el mapa de área de estudio y la ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos.

Procedimiento, materiales y equipos de muestreo

Procedimiento

En cada punto de muestreo, se tomó una cantidad de 250 g aproximadamente de sedimento, en el lecho del cauce del río, tratando en lo posible que represente a la población de sedimentos del entorno evaluado. El periodo de muestreo fue del 16 al 18 de noviembre del 2018, con el apoyo del responsable de monitoreo de la calidad de agua de ALA-Ramis.

Al momento de la toma de muestra de sedimento, según la cadena de custodia se registró los siguientes datos: La hora y fecha de muestreo, código, coordenadas UTM, parámetros a analizar (metales totales) y la descripción del punto de muestreo. Posteriormente las muestras de sedimentos han sido almacenadas en un cooler, refrigerados y enviados inmediatamente al laboratorio dentro del tiempo establecido para su análisis respectivo.

Tabla 6

Puntos de muestreo de sedimentos

N°	Código	Coordenadas UTM WGS 84		Altitud (msnm)	Descripción de los puntos de muestreo
		Este	Norte		
Cuenca Pucará (UH 018)					
1	RChac3	19L298318	8329213	4200	Río Chacapalca 80 m. antes de la unión con el río Ocuvi
2	ROcuv1	19L298064	8329360	4154	Río Ocuvi 50 m. antes de la unión con el río Chacapalca
3	RChac2	19L299889	8312555	4474	Río Chacapalca a 1 km de la confluencia de los ríos Azufrini y Pataqueña
4	RAzuf1	19L300580	8311666	4453	Río Azufrini 80 m antes de la unión con el río Pataqueña
5	RPata2	19L300832	8311040	4459	Río Pataqueña 30 m. después del vertimiento de efluente doméstico del campamento Arasi
6	RChac4	19L298333	8329537	4164	Río Chacapalca 100m después de la unión con el río Ocuvi
7	RChaq1	19L309529	8330674	4341	Río Chaquelle 30 m antes de la descarga mina las Águilas
8	RChaq2	19L309446	8330578	4334	Río Chaquelle 50mt después de la descarga mina las Águilas
9	RLlal1	19L294829	8344024	4172	Río Llallimayo 100mt aguas arriba de la bocatoma Llallimayo
10	RMaca2	19L311087	8362943	3925	Río Macarimayo, 20 m. aguas arriba del puente Macarimayo
11	RStro1	19L288378	8396748	4534	Río Santa Rosa, 50 m. aguas arriba de la planta quesera
12	RAyav1	19L328236	8352991	3910	Río Ayaviri, a 50 m aguas arriba del nuevo puente Ayaviri
13	RPuca1	19L354128	8336799	3871	Río Pucará, a 50 m aguas arriba del puente Pucará.
14	RPuca2	19L368386	8308290	3864	Río Pucará, a 100 m aguas abajo del puente Calapuja.
Intercuenca Ramis (UH 0179)					
15	RRami1	19L384902	8304768	3841	Río Ramis, a 100 m aguas arriba del puente Caminaca
16	RRami2	19L406156	8313266	3826	Río Ramis, a 50 m aguas abajo del puente Ramis.
Cuenca Azángaro (UH 019)					
17	LRinc1	19L445052	8378612	4646	Salida de la laguna Rinconada (Estructura de regulación)
18	QLuor1	19L449742	8382621	4659	Quebrada Lunar de Oro (1 km aprox. antes de lag. Rinconada)
19	RGran2	19L432023	8382014	4481	Río Grande, a 50 m aguas arriba del puente Chuquine
20	RCruc2	19L388910	8411341	4134	Río Crucero, a 100 m aguas arriba del puente colgante Crucero
21	RAnta3	19L364624	8414698	4083	Río Antauta, a 100 m aguas arriba antes de la confluencia con el río Crucero
22	RCruc3	19L363671	8413795	4077	Río Crucero, a 100 m aguas arriba de la bocatoma el Carmen.
23	RAzan2	19L372663	8348189	3870	Río Azángaro, a 250 m aguas abajo del vertimiento poblacional de Azángaro.
24	RLari1	19L356849	8387723	3969	Río Larimayo, a 50 metros aguas arriba del puente Palmeras unión con río Crucero.
25	RGran1	19L361510	8366370	3894	Río Grande, a 100 m aguas arriba unión con el río Crucero.
26	RCruc5	19L361101	8367654	3879	Río Crucero, a 200 m aguas arriba de la confluencia con el río Grande.

Materiales

Los materiales utilizados durante la toma de muestras fueron las siguientes: Cucharón de plástico, espátula de abanico, agua destilada, papel toalla, guantes de nitrilo, cinta métrica (wincha) de 5 metros, frascos de plástico para muestras de sedimento de 500 g, bolsas de ziplock medianas, cooler, cadena de custodia, cuaderno de campo, etiquetas, cintas transparentes, mapa de puntos de muestreo y cartel de punto de muestreo.

Equipos

Los equipos que se usaron durante la investigación fueron: GPS (Sistema de Posicionamiento Global), multiparámetro, cronómetro, equipos de laboratorio acreditado por INACAL, equipo de cómputo y movilidad.

3.4 Método de investigación

El método de investigación es cuantitativa y no experimental. Se ha empleado una *investigación cuantitativa*, siendo esta vía la más apropiada para este tipo de investigación y cuando queremos estimar las magnitudes (en este caso, las concentraciones de metales pesados en sedimentos), donde el suscrito examinó lo que se ha indagado previamente sobre el problema de estudio. Los datos presentados en este estudio se encuentran en forma de números (cantidades) y, por tanto, su recolección se fundamenta en la medición. En este caso, la recolección y medición se llevó a cabo utilizando procedimientos estandarizados y aceptados por la comunidad científica. Es *no experimental* porque las muestras no han sido sometidas a modificar sus concentraciones ni manipulación de variables.

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1 Evaluación de la concentración de los metales pesados en sedimentos

a) Análisis de sedimentos en laboratorio acreditado

Con el fin de cumplir el presente estudio, las muestras han sido analizadas en el laboratorio CERPER S.A. (Certificaciones del Perú S.A.), acreditado por el organismo peruano de acreditación INACAL (Instituto Nacional de Calidad del Perú) con registro N° LE 003 y vigente en la fecha de la toma y análisis de las muestras, con sede en la ciudad de Arequipa.

Las muestras han sido analizadas por el método **Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A, Revisión 1.2007**. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: *Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soil, and oils*).

Se analizaron 21 elementos metálicos, de los cuales 8 son de interés para el presente estudio (Ar, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn). El informe de ensayo indica los valores de detección de cada uno de los elementos analizados.

Análisis ICP-MS

Se determinó el contenido de cada uno de los metales pesados de las muestras de sedimentos utilizando un *espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)*. El ICP-MS es aplicable a la determinación de concentraciones de una gran cantidad de elementos en muestras de agua y en extractos o digestos de desechos como sedimentos. Cuando se requieren componentes disueltos, las muestras deben filtrarse y conservarse en ácido antes del análisis. La digestión ácida antes de la filtración y el análisis es necesaria para aguas subterráneas, muestras acuosas, desechos industriales, suelos, lodos, sedimentos y otros desechos sólidos para los cuales se requieren elementos totales (solubles en ácido).

El método de ensayo analítico ICP-MS, donde se utilizaron soluciones estándar mixtas. La muestra se tomó a una velocidad de 0.1 ml/min mediante un nebulizador de PFA de microflujo. El tiempo de integración fue de 3 s por masa y la potencia de RF fue de 1.3 kW, mientras que la potencia reflejada fue inferior a 1.0 W. Los caudales de plasma y gas nebulizador (gas argón) fueron de 16.0 L/min y 1.0 L/min. Cada muestra fue registrada tres veces por medición para obtener un recuento promedio con una desviación estándar para las mediciones de concentración elemental. Los contenidos de metal se determinaron mediante un método de calibración. Encontramos que el coeficiente de correlación (r^2) osciló entre 0.99 y 1.00 durante los experimentos. Todos los análisis se calcularon sobre la base del peso seco. Este análisis permite cuantificaciones multi-elementos de metales como As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Ni y Zn, respectivamente.

En el **Anexo 2** se encuentra el Informe de Ensayo N° 2-02111/18 donde reporta los valores de concentración de los 21 elementos analizados de las 26 muestras de sedimento.

b) Comparación de los resultados de la concentración de metales pesados en sedimentos

Los resultados del análisis en el laboratorio sobre la concentración de metales pesados en sedimentos en los 26 puntos de muestreo en los afluentes de la cuenca del río Ramis, han sido comparados con otros estudios a nivel local, nacional e internacional con el fin de evaluar comparativamente el nivel de concentración de metales pesados y ver el estado de calidad de los sedimentos en la zona de estudio.

c) Análisis estadístico

Para el análisis estadístico con el fin de clasificar los metales pesados en las muestras de sedimentos, los datos se investigaron estadísticamente utilizando software IBM SPSS Statistics 27. Para probar la idoneidad de los datos para los análisis de componentes principales, se realizó la prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). La prueba KMO calcula la adecuación del muestreo que es la proporción de varianza entre las variables bajo investigación que puede ser una varianza normal.

Se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP) de $\log(x+2)$ para homogenizar los datos de las concentraciones de metales pesados en cada una de las dos cuencas principales (Pucará con 14 puntos de muestreo y Azángaro con 10 puntos de muestreo) y no se consideró la intercuenca Ramis, puesto que solo se tiene dos muestras. El valor x corresponde al valor de la concentración (mg/kg) de cada metal pesado (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn).

3.5.2 Evaluación de la calidad de sedimento

Para cumplir con el segundo objetivo específico, se utilizó metodologías empleadas en muchos artículos científicos referidos al tema. La metodología para determinar la calidad de los sedimentos en los afluentes de la cuenca del río Ramis

mediante los índices geoquímicos, ecotoxicológicos y de riesgo ambiental. La metodología utilizada comprende el cálculo de los siguientes índices:

a) Evaluación mediante Directrices de la Calidad del Sedimento

La calidad de los sedimentos fueron evaluados mediante las *Directrices de Calidad de Sedimento SQG* (en inglés Sediment Quality Guidelines), que fijan valores de concentración de metales pesados en sedimentos y que tiene efecto adverso en el ecosistema acuáticos de agua dulce (MacDonald et al., 2000).

Se aplicaron dos valores establecidos por (MacDonald et al., 2000) denominados como valores “*Consensus Based TEC y PEC*”:

- *TEC: Threshold Effect Concentration* (Concentración Límite de Efecto); Cuando la concentración está por debajo de este valor, rara vez ocurrirá los efectos biológicos adversos.
- *PEC: Probable Effect Concentration* (Concentración de Probable Efecto); Cuando la concentración excede este valor, con frecuencia ocurrirá los efectos biológicos adversos.

b) Factor de enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento (FE) es un índice que ayuda a determinar si las muestras de sedimentos se encuentran enriquecidas en determinado elemento químico, por sobre los valores esperados. Es utilizado ampliamente como referencia para predecir el alcance de la contaminación por metales pesados y diferenciar si las fuentes son antropogénicas o naturales (Alexander et al., 1993). Se calculó el FE para cada elemento de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FE = \frac{\left(\frac{C_x}{C_N}\right)_{muestra}}{\left(\frac{C_x}{C_N}\right)_{Corteza}}$$

Donde $(C_x/C_N)_{muestra}$ es la relación del elemento (x) al elemento normalizador (N) en las muestras de sedimento y $(C_x/C_N)_{Corteza}$ es la relación del elemento (x) al elemento normalizador (N) en las condiciones de referencia (background). El elemento escogido como referencia (elementos “conservativos” que puede ser Fe, Al, V o Si). Lo que se realiza es una normalización entre las concentraciones

presentes en la muestra y las concentraciones presentes en la corteza terrestre continental (Kang et al., 2020). El elemento normalizador elegido para el presente estudio fue Fe.

De acuerdo al Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Ramis, Boletín N° 30 Serie C realizado por INGEMMET en el año 2006 (Zavala & Guerrero, 2006), un mayor porcentaje (42%) de la cuenca está conformado por rocas sedimentarias, los cuales se encuentran muy distribuidas en la cuenca, tanto en el sector central como en la parte superior de la cuenca, estructuralmente plegadas y falladas. De acuerdo a su litología predominante se agrupada en cinco subunidades: limolitas, limoarcillitas, areniscas arcósicas, lentes y nódulos; areniscas cuarzosas, limonitas, limoarcillitas y carbón; areniscas con intercalación de calizas micríticas; calizas micríticas, bioclásticas y espáticas; y conglomerados, areniscas conglomerádicas e intercalaciones de limoarcillitas (Zavala & Guerrero, 2006).

De acuerdo a dicha información indicada anteriormente, se considera a nivel de cuenca como rocas sedimentarias con predominancia de areniscas. Además, considerando que se desconocen los valores de concentración de cada metal en la corteza terrestre de la zona de estudio, se utilizaron los valores promedios propuestos por (Turekian & Wedepohl, 1961) como: Ar=1, Cd=0.09, Cr=35, Cu=28.8, Hg=0.03, Pb=7, Ni=2 y Zn=16 mg/kg y para el elemento normalizador Fe=9800 mg/kg.

Los valores de FE obtenidos han sido analizados básicamente bajo dos parámetros:

- 1) *Tipo de proveniencia*, según la tabla 7:

Tabla 7

Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento

Clases de FE	Calidad de sedimento
$FE > 10$	Origen antropogénico
$1 \leq FE \leq 10$	Origen geogénico o antropogénico
$FE < 1$	Origen geogénico

Fuente: (Alexander et al., 1993).

2) *Niveles de enriquecimiento* (asociado a contaminación), según la Tabla 8:

Tabla 8

Factor de Enriquecimiento (FE) en relación con la calidad de sedimento

Clases de FE	Calidad de sedimento
$FE < 1.5$	Sin enriquecimiento
$1.5 \leq FE < 3$	Enriquecimiento menor
$3 \leq FE < 5$	Enriquecimiento moderado
$5 \leq FE < 10$	Enriquecimiento moderadamente severo
$10 \leq FE < 25$	Enriquecimiento severo
$25 \leq FE < 50$	Enriquecimiento extremadamente severo

Fuente: Kang et al. (2020).

c) Índice de Geoacumulación

El índice de geoacumulación (I_{geo}) fue introducido por primera vez por Müller (1979), este es un índice cuantitativo para investigar la contaminación por metales pesados en sedimentos acuáticos y ha sido ampliamente utilizado para evaluar el grado de contaminación en sedimentos superficiales (Müller, 1979). Su fórmula de cálculo es como sigue:

$$I_{geo} = \text{Log}_2\left(\frac{C_n}{1.5B_n}\right)$$

Donde C_n es el contenido del metal pesado en la muestra de sedimento superficial y B_n es el valor de fondo (background) del metal examinado. Se introduce el factor 1.5 para minimizar las posibles variaciones en los valores de fondo que pueden ser atribuidos a los efectos litogénicos. El valor de fondo B_n (background) ha sido tomado de (Turekian & Wedepohl, 1961) como son: Ar=1, Cd=0.09, Cr=35, Cu=28.8, Hg=0.03, Pb=7, Ni=2 y Zn=16 mg/kg. Los valores de I_{geo} se clasifican en siete categorías (Tabla 9).

Tabla 9

Clases de I_{geo} en relación con la calidad de sedimento

Igeo	Clases de Igeo	Calidad de sedimento
$I_{geo} < 0$	0	No contaminado
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	No contaminado a moderadamente contaminado
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	Moderadamente contaminado
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	Moderadamente a altamente contaminado
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	Altamente contaminado
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	Altamente a muy altamente contaminado
$5 \leq I_{geo}$	6	Muy altamente contaminado

Fuente: Kang et al. (2020).

d) Índice de carga de contaminación

El Índice de Carga de Contaminación (en inglés *Pollution Load Index PLI*) se utiliza para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados en sedimento, fue propuesto por (Tomlinson et al., 1980). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$FC_i = \frac{C_i}{C_n}$$

$$PLI = \sqrt[n]{(FC_1 \times FC_2 \times \dots \times FC_n)}$$

Donde FC_i es el factor de contaminación calculado como la relación del metal pesado en la muestra de sedimento (C_i) con el valor de referencia preindustrial (C_n). Los valores que corresponde a los niveles de referencia preindustriales de metales pesados (C_n) es dado por (Hakanson, 1980), son As=15 mg/kg, Cd=1.0 mg/kg, Cr=90 mg/kg, Cu=50 mg/kg, Hg=0.25 mg/kg, Pb=70 mg/kg, y Zn=175 mg/kg (Hakanson, 1980). Ni=68 mg/kg (Rahman et al., 2014). Las clasificaciones de FC y PLI se encuentra en la Tabla 10.

Tabla 10

Factor de Contaminación (FC) e Índice de Carga de Contaminación (PLI)

FC	Categoría	PLI	Categoría
$FC < 1$	Baja contaminación	$PLI > 1$	Existe contaminación
$1 \leq FC < 3$	Contaminación moderada	$PLI < 1$	No hay contaminación
$3 \leq FC < 6$	Contaminación considerable		
$FC \geq 6$	Muy alta contaminación		

Fuente: (Hakanson, 1980; Tomlinson et al., 1980).

e) *Riesgo ecológico potencial*

Para determinar el riesgo ecológico potencial (en inglés *Potential Ecological Risk*), la metodología fue propuesta por (Hakanson, 1980), se aplica para evaluación integral de riesgo ecológico potencial que representan los metales pesados en sedimentos superficiales. Este índice enfatiza la respuesta toxicológica y la sensibilidad del organismo a estos metales.

El factor de riesgo ecológico potencial (E_i) para un metal individual, está definido por:

$$E_i = T_i * \frac{C_i}{C_o}$$

El Índice de Riesgo (IR) de los puntos de muestreo fueron calculados usando la siguiente ecuación:

$$IR = \sum_{i=0}^n E_i = \sum_{i=0}^n T_i * \frac{C_i}{C_o}$$

Donde, C_i es el contenido actual de metales pesados en el sedimento superficial, C_o es el contenido de fondo (valores que corresponde a los niveles de referencia preindustriales de metales pesados) dados por (Hakanson, 1980) y T_i es el factor de respuesta tóxica dado para un metal pesado ($As=10$, $Cd=30$, $Cu=Pb=Ni=5$, $Cr=2$, $Hg=40$ y $Zn=1$) (Hakanson, 1980).

Los valores que corresponde a los niveles de referencia preindustriales de metales pesados (C_o) dados por (Hakanson, 1980) son $As=15$ mg/kg, $Cd=1.0$ mg/kg, $Cr=90$ mg/kg, $Cu=50$ mg/kg, $Hg=0.25$ mg/kg, $Pb=70$ mg/kg, y $Zn=175$ mg/kg (Hakanson, 1980). $Ni=68$ mg/kg (Rahman et al., 2014). Las clasificaciones de E_i y IR se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11

Categoría de factor de riesgo ecológico potencial (Ei) e Índice de Riesgo (IR)

Ei	Categoría	IR	Categoría
$Ei \leq 40$	Riesgo ecológico bajo	$IR \leq 150$	Riesgo ecológico bajo
$40 < Ei \leq 80$	Riesgo ecológico moderado	$150 < IR \leq 300$	Riesgo ecológico moderado
$80 < Ei \leq 160$	Riesgo ecológico considerable	$300 < IR \leq 600$	Riesgo ecológico considerable
$160 < Ei \leq 320$	Alto riesgo ecológico	$600 < IR$	Muy alto riesgo ecológico
$320 < Ei$	Muy alto riesgo ecológico		

Fuente: (Hakanson, 1980; Kang et al., 2020).

3.5.3 Análisis de variación espacial de la concentración de metales pesados

Para cumplir con el tercer objetivo específico, se estableció el siguiente procedimiento de análisis:

a) Análisis espacial mediante la geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística que se centra en conjunto de datos espaciales o espacio-temporales y se utilizan ampliamente en geología, hidrología, meteorología, geografía, ciencias ambientales, ciencias del suelo y agricultura (Wang et al., 2021). La variación espacial de la concentración de metales pesados en la cuenca del río Ramis se analizaron mediante un método geoestadístico (Método de Kriging Ordinario – KO) y ArcGIS 10.4.

b) Método de Kriging Ordinario (KO)

El método de Kriging Ordinario (KO) en la geoestadística implica describir patrones espaciales (semivariogramas) y predecir los valores de atributos en ubicaciones no muestreadas (kriging) (Wang et al., 2014). El método de Kriging Ordinario (KO) es la técnica geoestadística más utilizada en este tipo de estudios (Huang et al., 2019). También se le conoce como el mejor predictor lineal insesgado porque supone que el valor medio del error de estimación es igual a cero, minimizando así la varianza del error de estimación (Golden et al., 2020).

El método de Kriging Ordinario (KO) tiene en cuenta la dirección de las variaciones e incorpora tendencias en la interpolación para crear mejores

predicciones (Wani et al., 2013). El KO se estima mediante una combinación lineal de los valores observados con pesos y el estimador es el siguiente:

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Donde $Z^*(x_o)$ es el valor estimado de Z en el punto x_o , $Z(x_i)$ es el valor muestreado de la concentración del metal pesado en el punto x_i , y λ_i es el cociente de peso asignado a $Z(x_i)$.

La siguiente ecuación fue utilizada para resolver λ_i de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \bar{\gamma}(x_i, V), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Donde, γ es el variograma bajo el supuesto estacionario de segundo orden y μ es el coeficiente langragiano.

Entonces, γ se puede obtener ajustando el variograma experimental:

$$\lambda(x, h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x + h)]^2$$

Donde, $\lambda(x + h)$ es el variograma experimental, $Z(x)$ y $Z(x + h)$ son variables de regionalización de $Z(x)$ en x y $x + h$, respectivamente.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de la concentración de los metales pesados en sedimentos

4.1.1 Resultados de ensayos en el laboratorio

En la Tabla 12 se muestra el resultado de análisis de laboratorio de la concentración de ocho metales pesados de las 26 muestras tomadas en los diferentes puntos de muestreo en los principales ríos afluentes de la cuenca del río Ramis, según el reporte presentado en el Informe de Ensayo N° 2-02111/18.

Respecto al As, hay una concentración promedio de 105 mg/kg y un valor máximo de 1079 mg/kg en la muestra (QLuor1) ubicado en la quebrada Lunar de Oro, próximo a la mina La Rinconada que recibe las descargas de las operaciones mineras del centro minero de La Rinconada y Lunar de Oro, el valor mínimo es de 1.55 mg/kg ubicado en el punto de muestreo (RMaca2) en el río Macarimayo, aguas abajo del puente Macarimayo. Respecto al Cd, el promedio es 0.88 mg/kg, la concentración máxima es de 13.30 mg/kg se ubica en el punto de muestreo (RChaq2) sobre el río Chaquelle a 50 metros aguas abajo de la mina Las Águilas y el valor mínimo de 0.02 mg/kg se encuentra en la muestra (RMaca2) del río Macarimayo, aguas arriba del puente Macarimayo. El Cr, tiene una concentración promedio de 11.60 mg/kg, el valor máximo es de 137.60 mg/kg en el punto de muestreo (RAzuf1) ubicado en el río Azufrini a 80 metros antes de la unión con el río Pataqueña y la menor concentración es de 1.70 mg/kg (RMaca2) ubicado en el río Macarimayo, aguas arriba del puente Macarimayo.

Tabla 12

Concentración de metales pesados (mg/kg d.w.) en los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis

Muestra	Código	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
1	RChac3	68.10	0.50	9.73	64.40	N.D.	33.40	8.99	43.20
2	ROcuv1	36.10	0.90	8.20	16.40	0.90	90.40	7.83	222.00
3	RChac2	35.70	0.10	9.60	228.00	N.D.	14.50	8.59	37.70
4	RAzuf1	991.00	0.20	137.60	386.00	0.10	17.80	8.40	20.00
5	RPata2	28.20	0.20	4.08	6.01	N.D.	63.40	4.16	57.00
6	RChac4	64.70	0.70	7.15	115.00	0.04	17.20	9.06	64.30
7	RChaq1	4.17	0.10	5.78	7.53	N.D.	5.98	9.33	43.00
8	RChaq2	5.69	13.30	9.08	22.40	N.D.	64.70	16.80	392.00
9	RLlal1	28.50	0.50	3.99	50.70	0.10	17.60	6.97	50.90
10	RMaca2	1.55	0.02	1.70	5.67	N.D.	2.74	1.40	18.90
11	RStro1	24.50	0.04	8.74	25.00	0.04	23.70	26.10	110.00
12	RAyav1	20.00	0.20	7.19	16.30	0.10	18.20	10.00	59.60
13	RPuca1	23.10	0.30	1.92	4.72	N.D.	4.96	4.72	19.90
14	RPuca2	21.90	0.10	6.93	6.10	N.D.	8.81	5.95	28.70
15	RRami1	19.00	0.10	5.55	8.35	N.D.	11.70	7.63	47.10
16	RRami2	21.70	0.10	4.16	5.28	N.D.	11.70	6.58	40.80
17	LRinc1	57.70	0.10	6.91	11.00	0.10	9.60	11.60	53.30
18	QLuor1	1079.00	0.20	3.26	13.30	3.88	29.90	11.70	33.80
19	RGran2	21.00	0.10	13.40	20.60	0.10	16.80	22.00	60.60
20	RCruc2	84.60	3.48	16.70	30.50	0.20	33.50	36.10	1242.00
21	RAnta3	39.00	0.60	7.73	41.70	0.10	27.40	14.50	156.00
22	RCruc3	24.20	0.70	7.60	14.70	N.D.	33.50	11.50	190.00
23	RAzan2	8.44	0.10	4.49	3.96	N.D.	9.76	5.56	41.50
24	RLari1	3.83	0.03	3.08	2.80	10.50	4.93	3.52	11.30
25	RGran1	9.45	0.10	3.82	4.23	0.10	5.90	4.16	23.20
26	RCruc5	10.10	0.10	3.08	4.44	0.10	8.88	4.51	47.90
Promedio		105.05	0.88	11.60	42.89	1.17	22.58	10.29	119.80
Valor Máximo		1079.00	13.30	137.60	386.00	10.50	90.40	36.10	1242.00
Valor Mínimo		1.55	0.02	1.70	2.80	0.04	2.74	1.40	11.30
Desviación Estándar		274.85	2.62	25.93	84.55	2.87	21.15	7.68	243.46
TEC		9.79	0.99	43.40	31.60	0.18	35.80	22.70	121.00
PEC		33.00	4.98	111.00	149.00	1.06	128.00	48.60	459.00

N.D: No Detectado. d.w: Peso seco.

Fuente: Informe de Ensayo N° 2-02111/18 del Laboratorio CERPER S.A.

Respecto a Cu, el promedio es de 42.89 mg/kg, la concentración máxima es de 386 mg/kg en el punto de muestreo (RAzuf1) ubicado en el río Azufrini a 80 metros antes de la unión con el río Pataqueña y el río Azufrini que recibe todas las descargas de aguas de mina y el punto se ubica dentro de las operaciones mineras de Aruntani SAC y la menor concentración es de 2.80 mg/kg de la muestra (RLari1) punto ubicado en el río Larimayo a 50 metros aguas arriba del puente Palmeras unión con el río Crucero (próximo al pueblo de San Antón).

El Hg tiene una concentración promedio de 1.17 mg/kg y la concentración máxima es de 10.50 mg/kg en el punto de muestreo (RLari1) ubicado en el río Larimayo a 50 metros aguas arriba del puente Palmeras unión con el río Crucero, seguido de una concentración de 3.88 mg/kg en el punto de muestreo (QLuor1) ubicado en la quebrada Lunar de Oro, próximo a la mina La Rinconada y Lunar de Oro; y la concentración mínima es de 0.04 mg/kg en los puntos de muestreo (RChac4) ubicado en el río Chacapalca 100 metros después de la unión con el río Ocuvi y (RStro1) ubicado en el río Santa Rosa, aguas arriba de la planta quesera. Respecto al Pb se tiene una concentración promedio de 22.58 mg/kg y un valor máximo de 90.40 mg/kg en el punto (ROcuv1) ubicado sobre el río Ocuvi antes de la unión con el río Chacapalca y el valor mínimo es de 2.74 mg/kg en el punto (RMaca2) que corresponde al río Macarimayo, aguas arriba del puente Macarimayo. Respecto a Ni, el promedio es de 10.29 mg/kg con un valor máximo de 36.10 mg/kg en el punto (RCruc2) ubicado en el río Crucero a 100 metros aguas arriba del puente colgante Crucero y el valor mínimo es de 1.40 mg/kg en el punto (RMaca2) que corresponde al río Macarimayo, aguas arriba del puente Macarimayo. Finalmente, respecto a Zn el promedio es de 119.80 mg/kg, con valor máximo de 1242 mg/kg en el punto (RCruc2) ubicado en el río Crucero a 100 metros aguas arriba del puente colgante Crucero y el valor mínimo es de 11.30 mg/kg en el punto (RLari1) ubicado en el río Larimayo a 50 metros aguas arriba del puente Palmeras unión con el río Crucero.

4.1.2 Comparación de resultados con otros estudios a nivel local

En la Tabla 13 se encuentra la comparación con otros estudios a nivel local, fundamentalmente en la subcuenca Azángaro, mientras que para la subcuenca Ayaviri-Pucará no hay estudios previos.

Tabla 13

Comparación de resultados con otros estudios, concentración promedio de metales pesados en sedimentos (mg/kg d.w.) cuenca Azángaro e intercuenca

Ramis

Puntos de interés para la comparación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Referencia
Entrada a la Laguna Rinconada (1 pto)					205				(Gammons et al., 2006)
Laguna Rinconada (1 punto)					1.80				(Gammons et al., 2006)
Desembocadura del río Ramis (1 pto: L3)		1.98		41.09	0.78	74.97		324.00	(Monroy et al., 2014)
Río Grande, Quenamari y Azángaro (6 ptos)	43.05				0.07	25.67			(Olarate & Pacheco Tanaka, 2009)
Río Crucero (3 ptos)					0.37	28.80			(Pérez, 2017)
Río Grande, Crucero, Antauta y Azángaro (6 ptos)	24.67	0.61			0.04	10.33			(Incahuanaco, 2018)
Río Ananea	0.14	0.01	0.04			0.05			(Pari-Huaquisto et al., 2020)
Subcuenca Azángaro (10 ptos)	133.73	0.55	7.01	14.72	1.89	18.02	12.52	185.96	Presente estudio
Intercuenca Ramis (2 ptos)	20.35	0.10	4.86	6.82	N.D.	11.7	7.11	43.95	Presente estudio

Según la literatura revisada, se tiene cinco estudios solo a nivel de la subcuenca Azángaro, entre ellos reportan valores de algunos metales pesados en sedimentos. Para el caso de As, Olarte y Pacheco Tanaka (2009) reporta un valor de 43,05 mg/kg, Incahuanaco (2018) reporta 24.67 mg/kg menor a los valores encontrados en el presente estudio en los diez puntos de monitoreo. Respecto a Cd, en la desembocadura del río Ramis la concentración (1.98 mg/kg) reportado por Monroy et al. (2014) es mayor al presente estudio pero poco significativo. No hay valores de Cr para comparar con otros estudios. Respecto al metal Cu, (Monroy et al., 2014) reporta 41.09 mg/kg que es superior al presente estudio. Respecto al

metal Hg, (Gammons et al., 2006) reporta 205 mg/kg en la entrada a la Laguna Rinconada, valor extremadamente superior registrado en el presente estudio, que registra 3.88 mg/kg en el punto de muestreo QLuor1, del mismo modo superior a la salida de la laguna, cabe indicar que estos puntos de muestreo se encuentran en las nacientes de las aguas del río Grande, luego Crucero y Azángaro. Por otro lado, respecto a Pb, los reportes realizados por Monroy et al. (2014), Olarte y Pacheco Tanaka (2009) y Pérez (2017) reportan valores superiores a (Incahuanaco, 2018) y el presente estudio. Finalmente, respecto a Zn, (Gammons et al., 2006) reporta un valor (324 mg/kg) en la desembocadura del río Ramis superior al promedio de los valores encontrados en la subcuenca Azángaro y en la intercuenca Ramis del presente estudio.

4.1.3 Comparación de resultados con otros estudios a nivel nacional

En la Tabla 14 se encuentra la comparación con otros estudios a nivel nacional, respecto a la concentración de metales pesados en sedimentos en el Perú.

La Tabla 15 ha sido calculado en función de la Tabla 14, donde se clasificó en función de los valores de la concentración de metales pesados obtenidos en los diferentes estudios a nivel nacional.

Se revisó 10 estudios referidos al tema a nivel del Perú. Para el caso de As, el 62.50% supera los valores de PEC, para el caso de Cd un 62.50% es menor al valor de TEC. Para Cr, el 57.14% es menor de TEC, así como para Cu (45.45%) es menor a TEC. Para el caso de Hg, un 75% es superior a valor del PEC. Para Pb, un 54.55% se encuentra entre TEC y PEC. Para el caso de Ni (66.67%) y Zn (63.64%) son menores al valor de TEC, respectivamente.

Los resultados obtenidos han sido comparados con otros estudios a nivel nacional; respecto al valor de As (105.05 mg/kg) es superado solo por el río Rímac (231 mg/kg) los valores de TEC y PEC, al igual que las concentraciones del río Chillón y Lurín (Rivera et al., 2007) y el río Santa (Rivera & Chira, 2008) superan los valores de TEC y PEC. El metal Cd del presente estudio (0.88 mg/kg) es superado por los valores del río Chillón, Rímac y Lurín (Rivera et al., 2007) y el río Santa (Rivera & Chira, 2008) los valores de TEC. El Cr (11.60 mg/kg) del presente

estudio, es superado por los valores del río Chillón, Rímac y Lurín (Rivera et al., 2007), y el valor de TEC, además, solo el río Lurín supera el valor de PEC. respectivamente.

Tabla 14

Comparación de concentración promedio de metales pesados en sedimento (mg/kg d.w.) a nivel nacional

Río, Región	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Referencia
Río Chillón (Lima)	68.00	2.00	107.00	105.00	22.00	68.60	38.00	269.00	(Rivera et al., 2007)
Río Rímac (Lima)	231.00	3.40	106.00	209.00	59.00	356.00	26.00	786.00	(Rivera et al., 2007)
Río Lurín (Lima)	63.00	0.90	154.00	98.00	9.00	57.00	19.00	199.00	(Rivera et al., 2007)
Río Santa (Huaraz)	47.55	1.23	18.35	30.34	0.05	38.39	18.74	169.86	(Rivera & Chira, 2008)
Río Chillón (Lima)	S.D.	S.D.	S.D.	20.00	S.D.	40.33	S.D.	101.67	(Chui et al., 2009)
Río Nanay, Libertad (Loreto)	S.D.	0.24	S.D.	40.48	1.64	48.59	S.D.	61.25	(Sotero-solís & Alva-astudillo, 2013)
Río Nanay, Bellavista (Loreto)	S.D.	0.34	S.D.	43.64	3.00	51.40	S.D.	66.41	(Sotero-solís & Alva-astudillo, 2013)
Río Tambopata (Madre de D.)	0.64	S.D.	S.D.	11.81	S.D.	1.99	S.D.	46.23	(Patilla, 2015)
Río Chili (Arequipa)	1.53	0.51	4.95	15.81	0.01	5.63	S.D.	13.14	(Monge, 2018)
Minería Aluvial (Madre de D.)	2.07	S.D.	9.14	13.98	S.D.	5.21	8.99	30.55	(Velásquez Ramírez et al., 2020)
Cuenca del Río Ramis (Puno)	105.05	0.88	11.60	42.89	1.17	22.58	10.29	119.80	Presente estudio
TEC	9.79	0.99	43.40	31.60	0.18	35.80	22.70	121.00	(MacDonald et al., 2000)
PEC	33.00	4.98	111.00	149.00	1.06	128.00	48.60	459.00	(MacDonald et al., 2000)

S.D. Sin dato.

Tabla 15

Comparación de metales pesados en sedimentos con valores de TEC y PEC a nivel nacional

TEC Y PEC	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
N° muestras < TEC	3	5	4	5	2	4	4	7
%	37.50	62.50	57.14	45.45	25.00	36.36	66.67	63.64
N° muestras entre TEC y PEC	0	3	2	5	0	6	2	3
%	0.00	37.50	28.57	45.45	0.0	54.55	33.33	27.27
N° de muestras > PEC	5	0	1	1	6	1	0	1
%	62.50	0.00	14.29	9.09	75.0	9.09	0.00	9.09

Por otro lado, la concentración de Cu (42.89 mg/kg) es superado por los valores del río Chillón, Rímac y Lurín (Rivera et al., 2007) y río Nanay Bellavista (Sotero-solís & Alva-astudillo, 2013) y superan los valores de TEC y solo el río Rímac supera el valor de PEC. Respecto al Hg (1.17 mg/kg) del presente estudio, es superado por los valores del río Chillón, Rímac y Lurín (Rivera et al., 2007), río Nanay (puntos Libertad y Bellavista) (Sotero-solís & Alva-astudillo, 2013) y todos superan los valores de TEC y PEC. Respecto a los valores de Pb, Ni y Zn del presente estudio es superado por los valores de los ríos Chillón, Rímac y Lurín (Rivera et al., 2007) y río Santa (Rivera & Chira, 2008). Mientras que otro estudio del río Chillón (Chui et al., 2009) no supera el valor del presente estudio, pero no superan los valores de PEC. Por último, los concentraciones de metales en otros estudios son bastantes bajos respecto al presente estudio y valores de TEC (Monge, 2018; Patilla, 2015; Velásquez Ramírez et al., 2020).

4.1.4 Comparación de resultados con otros estudios a nivel internacional

Los resultados obtenidos en el presente estudio se comparan con estudios a nivel internacional (Tabla 16). En la Tabla 17 ha sido calculado en función de la Tabla 16, donde se clasificó en función de los valores de la concentración de metales pesados. Se revisó 31 estudios. Los valores más altos para el caso de As (46.67%), Cd (50.00%), Cr (69.23%) y Cu (64.29%) se encuentran entre los valores de PEC y TEC, para el caso de Hg (77.8%) se encuentra con valores menores a TEC. Para el Pb (51.72%), Ni (50.00%) se encuentran entre los valores de TEC y PEC. Por último, para el Zn (50.00%) se encuentran por debajo de los valores de TEC, respectivamente.

Tabla 16

Comparación de concentración promedio de metales pesados en sedimento (mg/kg d.w.) con otros estudios a nivel internacional

Río, País	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Referencia
Mamut River (Malasia)	S.D.	S.D.	S.D.	583.38	S.D.	23.48	170.74	61.4	(Mohammad Ali et al., 2015)
Korotoa River (Bangladesh)	25.00	1.20	109.00	76.00	S.D.	58.00	95.00	S.D.	(Islam et al., 2015)
Lagos de agua dulce (21) (China)	12.10	0.19	85.00	31.70	0.05	31.00	36.80	88.00	(Cheng et al., 2015)
Yangtze River, Three Gorges (China)	14.31	0.87	105.40	58.44	0.13	48.08	51.12	161.3	(Wei et al., 2015)
Cuenca del Río Puyango (Ecuador)	S.D.	S.D.	S.D.	27.10	0.08	31.50	37.00	193.00	(Mora et al., 2016)
Gorges River (Australia)	11.00	S.D.	39.00	30.00	S.D.	67.00	13.00	157.0	Alyazichi et al. (2016)
Karnaphuli River (Bangladesh)	81.09	2.01	20.30	S.D.	S.D.	43.69	S.D.	S.D.	(Ali et al., 2016)
Ziya River (Northern China)	S.D.	1.31	460.00	91.00	S.D.	49.70	39.10	459.0	(Zhu et al., 2016)
Three Gorges Reservoir (China)	S.D.	0.63	93.00	63.00	S.D.	16.90	41.20	583.3	Gao et al. (2016)
Magdalena River (Colombia)	S.D.	1.31	S.D.	27.20	0.04	12.10	17.00	81.3	(Tejeda-Benitez et al., 2016)
Barigui River Basin G-0 (Brasil)	S.D.	1.20	69.70	20.60	S.D.	24.30	S.D.	143.0	(Machado et al., 2017)
Swamamukhi River Basin (India)	S.D.	0.20	85.25	100.90	S.D.	21.39	2.43	63.4	(Patel et al., 2018)
Liuyang River (Southern China)	14.55	1.24	38.67	50.20	S.D.	37.82	17.48	138.5	(Jia et al., 2018)
Nil River (Argelia)	S.D.	2.34	S.D.	38.83	S.D.	61.50	S.D.	96.2	(Sciences & Life, 2017)
Ghaghara River (India)	S.D.	0.25	74.47	7.25	S.D.	12.49	20.44	15.4	(Singh et al., 2017)
Houjing River (Taiwan)	S.D.	4.39	53.11	432.29	S.D.	57.23	71.17	341.9	(Vu et al., 2017)
Sao Joao River Basin (Brasil)	S.D.	88.97	99.07	99.40	S.D.	95.80	S.D.	102.3	(da Silva et al., 2017)
Zijiang River, Hunan (China)	44.07	3.86	71.90	38.69	S.D.	58.51	36.90	147.0	(Zhang et al., 2018)
Átoyac River Basin (México)	3.14	S.D.	129.59	27.16	S.D.	14.06	28.96	112.5	(Rodríguez-Espinosa et al., 2018)

Feni River Estuary (Bangladesh)	0.85	S.D.	35.28	S.D.	0.71	6.47	33.27	S.D.	(Islam et al., 2018)
Mustafakemalpasa stream (Turquía)	154.00	8.74	516.00	26.20	S.D.	65.60	274.00	110.0	(Omwene et al., 2018)
Urban River (Filipinas)	S.D.	S.D.	89.45	116.36	S.D.	S.D.	61.14	213.7	(Decena et al., 2018)
Anning River (China)	17.88	0.70	103.90	49.90	0.02	213.80	36.00	125.2	(Wang et al., 2018)
Ganga River (India)	S.D.	1.60	64.54	35.57	S.D.	13.84	25.00	42.0	(Siddiqui & Pandey, 2019)
Three Gorges Reservoir, 2016 (China)	S.D.	1.01	86.40	49.50	S.D.	54.50	38.60	185.1	(Bing et al., 2019b)
Three Gorges Reservoir, 2017 (China)	13.20	1.03	101.00	60.90	0.13	62.50	46.60	164.0	(L. Gao et al., 2019)
Hai River and Tributaries, Tianjin (China)	S.D.	0.26	92.09	74.23	S.D.	36.08	44.63	89.4	(Kang et al., 2020)
Atrato River (Colombia)	3.53	0.22	163.20	93.40	S.D.	5.62	55.20	S.D.	(Palacios-Torres et al., 2020)
Oiartzun River Basin (España)	8.39	0.97	48.40	24.90	0.18	85.80	25.70	3.4	(Arambourou et al., 2020)
Korotoa River (Bangladesh)	12.18	1.49	S.D.	165.84	0.17	64.67	114.13	243.68	(Proshad et al., 2022)
Yangtze River (riverine sediment) (China)	11.72	0.66	88.97	38.16	0.11	32.23	35.22	110.25	(Liu et al., 2023)
Cuenca del Río Ramis Puno (Perú)	105.05	0.88	11.60	42.89	1.17	22.58	10.29	119.8	Presente estudio
TEC	9.79	0.99	43.40	31.60	0.18	35.80	22.70	121.00	(MacDonald et al., 2000)
PEC	33.00	4.98	111.00	149.00	1.06	128.00	48.60	459.00	(MacDonald et al., 2000)
S.D. Sin dato.									

Tabla 17

Comparación de metales pesados en sedimento con valores de TEC y PEC a nivel internacional

TEC y PEC	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
N° muestras < TEC	4	10	4	8	7	13	6	13
%	26.6	41.6	15.3	28.5	77.	44.8	23.0	50.0
N° muestras entre TEC y PEC	7	7	8	7	8	3	8	0
%	46.6	50.0	69.2	64.2	11.	51.7	50.0	46.1
N° de muestras > PEC	7	0	3	9	1	2	0	5
%	4	2	4	2	1	1	7	1
	26.6	8.33	15.3	7.14	11.	3.45	26.9	3.85
	7		8		1		2	

Los promedios de concentraciones de metales pesados obtenidos en el presente estudio, respecto al valor de As (105.05 mg/kg) es superado solo por el Mustafakemalpassa stream (Turquía) con 154.00 mg/kg (Omwene et al., 2018) y que supera los valores de TEC y PEC significativamente. El metal Cd del presente estudio (0.88 mg/kg) es superado (inclusive valores de PEC) los valores encontrados en Sao Joao River Basin (Brasil) con 88.97 mg/kg ((da Silva et al., 2017); Mustafakemalpassa stream (Turquía) con 8.74 mg/kg (Omwene et al., 2018). Para Cr del presente estudio (11.60 mg/kg) es superado (inclusive los valores de PEC) las concentraciones encontradas en los ríos Ziya (Northern China) con 460 mg/kg (X. Zhu et al., 2016); Átoyac River Basin (México) con 129.59 mg/kg (Rodríguez-Espinosa et al., 2018) y Atrato (Colombia) con 48.40 mg/kg (Palacios-Torres et al., 2020). Para el Cu del presente estudio (42.89 mg/kg) es superado (inclusive valores de PEC) las concentraciones encontradas en los ríos Mamut (Malasia) con 583.38 mg/kg (Mohammad Ali et al., 2015); Houjing (Taiwan) con 432.29 mg/kg (Vu et al., 2017), respectivamente. Para el caso de Hg, la concentración de este metal en el presente estudio fue 1.17 mg/kg y comparado con otros estudios no es superado por ninguno de ellos. Respecto al Pb del presente estudio (22.58 mg/kg) es superado por muchos estudios; sin embargo, incluyendo el valor de PEC es superado únicamente por el río Anning (China) con 213.80 mg/kg, muy superior al valor de PEC de 128.00 mg/kg (X. Wang et al., 2018). El Ni del presente estudio (10.29 mg/kg) es superado por los valores de concentración encontrados (inclusive valor de PEC) de los ríos Mamut (Malasia) con 170.74 mg/kg (Mohammad Ali et al., 2015); Korotoa (Bangladesh) con 95.00 mg/kg (Islam et al., 2015); Yangtze, Three Gorges Reservoir (China)

con 51.12 mg/kg (Wei et al., 2015); Houjing (Taiwan) con 71.17 mg/kg (Vu et al., 2017); Mustafakemalpassa stream (Turquía) con 274.00 mg/kg (Omwene et al., 2018); Urban (Filipinas) con 61.14 mg/kg (Decena et al., 2018) y Atrato (Colombia) con 55.20 mg/kg (Palacios-Torres et al., 2020). El Zn tiene una concentración de 119.8 mg/kg en el presente estudio y es superado (inclusive el valor de TEC) por Three Gorges Reservoir (China) con 583.3 mg/kg (J. min Gao et al., 2016), respectivamente.

4.1.5 Análisis estadístico

Respecto al análisis estadístico de los datos de concentración de metales pesados en sedimentos y siguiendo la metodología establecida, se tiene los siguientes resultados.

a) Análisis factorial

Antes de efectuar el procesamiento estadístico, por razones de seguridad del cálculo, es necesario conocer si los datos presentan una distribución normal, de no ser así, se debe calcular con nuevas variables con valores logarítmicas (Rivera et al., 2007). Para ello se han efectuado la transformación de los valores de concentración de metales pesados en sedimentos mediante la siguiente ecuación $\log(x+2)$ para homogenizar los datos de las concentraciones de metales pesados en cada una de las dos cuencas principales (Pucará con 14 puntos de muestreo y Azángaro con 10 puntos de muestreo), donde x es el valor de la concentración de cada metal en un punto de muestreo.

b) La media de los metales pesados

En la Tabla 18 se observa la media de la concentración de metales pesados en sedimentos en los puntos (14 puntos) ubicados dentro de la cuenca Pucará. La media de los metales pesados en los sedimentos de cada litología presenta la siguiente secuencia:

Zn>As>Cu>Pb>Ni>Cr>Cd>Hg

Tabla 18

Estadísticos descriptivos Cuenca Pucará

Estadísticos descriptivos			
	Media	Desv. Estándar	No de análisis
As	1.4685	0.5753	14
Cd	0.4175	0.2258	14
Cr	0.9894	0.3707	14
Cu	1.4580	0.5762	14
Hg	0.3183	0.0424	14
Pb	1.3153	0.3813	14
Ni	0.9984	0.2141	14
Zn	1.7498	0.3723	14

En la Tabla 19 se observa la media de la concentración de metales pesados en sedimentos en los puntos (10 puntos) ubicados dentro de la cuenca Azángaro. La media de los metales pesados en los sedimentos de cada litología presenta la siguiente secuencia:

Zn>As>Pb>Cu>Ni>Cr>Hg>Cd.

Tabla 19

Estadísticos descriptivos Cuenca Azángaro

Estadísticos descriptivos			
	Media	Desv. Estándar	No de análisis
As	1.5076	0.6495	10
Cd	0.3896	0.1466	10
Cr	0.9090	0.2029	10
Cu	1.1088	0.3345	10
Hg	0.4422	0.2703	10
Pb	1.2257	0.2771	10
Ni	1.0803	0.2746	10
Zn	1.8532	0.5535	10

c) Medida Kaiser-Meyer-Olkin

La medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo es un estadístico que indica la proporción de varianza en las variables que pueden ser causadas por factores subyacentes. Los valores altos (cerca de 1.0) generalmente indican que un análisis factorial puede ser útil con los datos.

Las Tablas 20 y 21 muestran dos pruebas que indican la idoneidad de los datos para la detección de estructuras. La medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo es un estadístico que indica la proporción de varianza en las variables que pueden ser causadas por factores subyacentes. En este caso la medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo de la cuenca Azángaro es mayor que de la cuenca Pucará, del mismo modo la prueba de esfericidad de Bartlett ($74.152 > 72.956$).

Tabla 20

Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), Cuenca Pucará

Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.336
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	72.956
	gl	28
	Sig.	<0.001

Tabla 21

Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), Cuenca Azángaro

Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.585
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	74.152
	gl	28
	Sig.	<0.001

d) Análisis de correlación lineal de Pearson

El análisis de correlación lineal de Pearson se ha realizado con el objetivo de establecer el grado de asociación entre las variables (metales) analizadas.

En la Tabla 22 se observa que, en la cuenca Pucará los elementos que se correlacionan linealmente son: As con Cr y Cu; Cd con Zn; Pb con Zn y Ni con Zn con un nivel de significación de $p < 0.001$, como así lo demuestra la fuerte dependencia lineal positiva con coeficiente de correlación $r > 0.5$. Por otro lado, en la Tabla 23 se observa que, en la cuenca Azángaro se correlaciona linealmente metales: As con Cu, Pb y Ni; Cd con Cr, Cu, Pb y Ni; Zn con Cd, Cr, Cu, Pb y Ni; sin embargo, el Hg no se asocia con ningún metal. Las correlaciones entre los metales nos indican que podrían tener el mismo origen de procedencia. Por otro

lado, correlaciones menos acentuadas se dan para el Ar, Cr y Hg con los demás metales respectivamente.

Tabla 22

Matriz de correlación de Pearson entre metales - Cuenca Pucará

		Matriz de correlaciones ^a							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
Correlación	As	1	-0.22	0.809	0.735	0.161	0.26	0.175	-0.21
	Cd	-0.22	1	0.043	0.011	0.023	0.485	0.374	0.725
	Cr	0.809	0.043	1	0.72	0.111	0.243	0.361	-0.03
	Cu	0.735	0.011	0.72	1	-0	0.185	0.342	-0.04
	Hg	0.161	0.023	0.111	-0	1	0.497	0.038	0.447
	Pb	0.26	0.485	0.243	0.185	0.497	1	0.438	0.78
	Ni	0.175	0.374	0.361	0.342	0.038	0.438	1	0.621
	Zn	-0.21	0.725	-0.03	-0.04	0.447	0.78	0.621	1

a. Determinante = 0.000

Tabla 23

Matriz de correlación de Pearson entre metales - Cuenca Azángaro

		Matriz de correlaciones ^a							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
Correlación	As	1	0.284	0.161	0.537	0.081	0.681	0.546	0.301
	Cd	0.284	1	0.687	0.584	-0.21	0.604	0.712	0.908
	Cr	0.161	0.687	1	0.78	-0.47	0.582	0.908	0.802
	Cu	0.537	0.584	0.78	1	-0.35	0.845	0.897	0.761
	Hg	0.081	-0.21	-0.47	-0.35	1	-0.25	-0.34	-0.5
	Pb	0.681	0.604	0.582	0.845	-0.25	1	0.79	0.761
	Ni	0.546	0.712	0.908	0.897	-0.34	0.79	1	0.814
	Zn	0.301	0.908	0.802	0.761	-0.5	0.761	0.814	1

a. Determinante = 1.396E-6

e) Análisis de componentes principales

En la cuenca Pucará se tiene tres componentes principales: Componente principal 1: Tiene asociación Zn-Cd-Pb-Ni, entre los cuales la correlación lineal es positiva ($r > 0.5$). Componente principal 2: Presenta asociación As-Cu-Cr con $r > 0.5$ una positiva alta y una asociación menor al Ni. Componente principal 3: Presenta asociación Hg-Pb con correlación baja, respectivamente (ver Tabla 24 y Figura 4).

En la cuenca Azángaro se tiene tres componentes principales: Componente principal 1: Tiene asociación Zn-Cr-Cd-Ni-Cu-Pb entre los cuales la correlación lineal es positiva ($r > 0.5$). Componente principal 2: La asociación As-Pb con $r > 0.5$ es positiva. Componente principal 3: No hay ninguna asociación de Hg con otros metales, respectivamente (Ver tabla 25 y Figura 5).

Tabla 24

Matriz de coeficiente de puntuación de componentes principales - Cuenca Pucará

	Componente		
	1	2	3
	As	0.161	0.323
Cd	0.169	-0.228	-0.340
Cr	0.200	0.272	-0.058
Cu	0.181	0.272	-0.160
Hg	0.139	-0.075	0.726
Pb	0.262	-0.124	0.219
Ni	0.231	-0.045	-0.364
Zn	0.230	-0.277	0.001

Método de extracción: análisis de componentes principales.

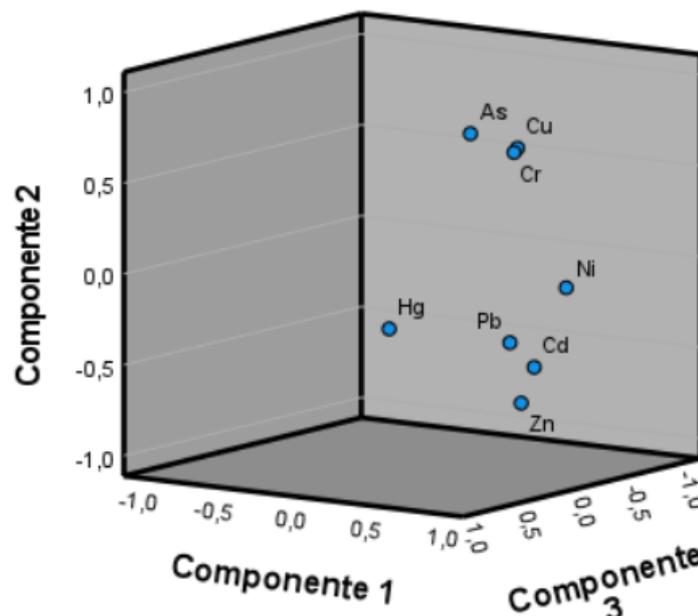


Figura 4. Componentes principales en espacio rotado - Cuenca Pucará

Tabla 25

Matriz de coeficiente de puntuación de componentes principales - Cuenca

Azángaro

	Matriz de coeficiente de puntuación de componente		
	Componente		
	1	2	3
As	0.100	0.587	-0.357
Cd	0.154	-0.077	0.709
Cr	0.165	-0.245	0.135
Cu	0.175	0.093	-0.223
Hg	-0.084	0.511	0.793
Pb	0.166	0.246	-0.203
Ni	0.182	0.050	0.011
Zn	0.177	-0.166	0.233

Método de extracción: análisis de componentes principales.

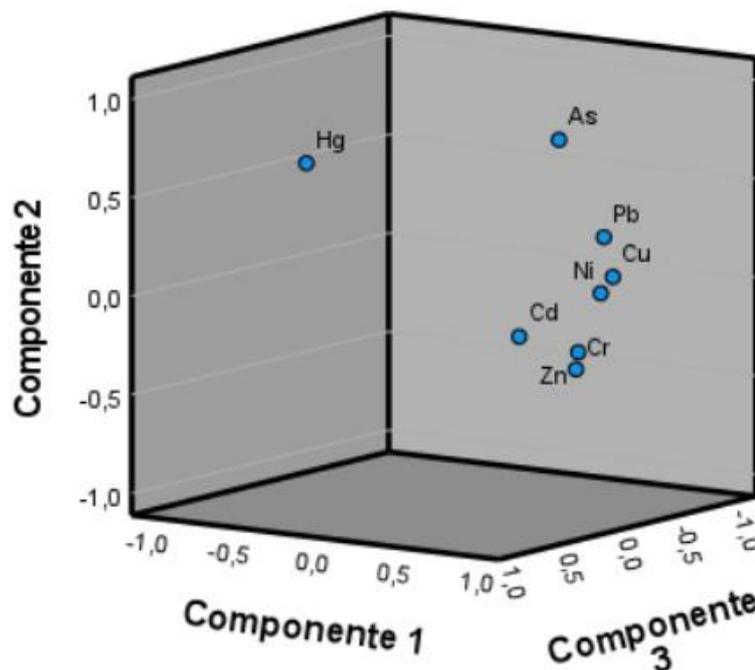


Figura 5. Componentes principales en espacio rotado - Cuenca Azángaro

4.2 Evaluación de la calidad de sedimentos

4.2.1 Evaluación mediante Directrices de la calidad de sedimentos

Los valores de calidad de sedimentos más utilizados para el presente estudio corresponde a (MacDonald et al., 2000) como valores “Consensus Based TEC y

PEC”, donde TEC (Concentración Límite de Efecto) (en Inglés Threshold Effect Concentration) y PEC (Concentración de Probable Efecto) (en Inglés Probable Effect Concentration).

En la Tabla 26 se realizó la clasificación del número de muestras que son menores a TEC, muestras que se encuentran entre TEC y PEC y muestras que superan a los valores de PEC, de los diferentes porcentajes de muestras de cada punto que contiene valores de concentración de metales pesados en sedimentos (Tabla 26).

Tabla 26

Número de muestras y % que representa <TEC, entre TEC y PEC y >PEC de los valores de concentración de metales pesados en sedimentos

TEC y PEC	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
N° muestras < TEC	6	24	25	20	10	23	24	21
%	23.08	92.31	96.15	80.00	71.43	88.46	92.31	80.77
N° muestras entre TEC y PEC	11	1	0	4	2	3	2	5
%	42.31	3.85	0.00	16.00	14.29	11.54	7.69	19.23
N° de muestras > PEC	9	1	1	1	2	0	0	0
%	34.62	3.85	3.85	4.00	14.29	0.00	0.00	0.00

Arsénico (As)

En As, el 23.08% de las muestras tienen valores de concentración menores a TEC y un 42.31% entre TEC y PEC y un 34.62% supera los valores de PEC, del total de las muestras respectivamente. Los sitios contaminados con As que superan el valor de PEC, probablemente tenga efectos biológicos en los organismos acuáticos. En la subcuenca Ayaviri-Pucará, los puntos de muestreo (RChac3, RChac2, RAzuf1 y RChac4) más críticos que superan los valores de PEC, puntos ubicados dentro de las operaciones mineras Aruntani SAC y aguas abajo de la misma mina, en los ríos Azufrini y Chacapalca. Por otro lado, el punto de muestreo (ROcuv1) que corresponde al río Ocuviri antes de la unión con el río Chacapalca, el valor de As es mayor a TEC, esto se atribuiría al vertimiento de las aguas residuales del distrito de Ocuviri a este río.

En la cuenca Azángaro, los puntos de muestreo (LRinc1, QLuor1, RCruc2 y RAnta3) que superan los valores de PEC; los tres primeros puntos están ubicados

en la quebrada Lunar de Oro, Laguna Rinconada y el río Crucero, reciben las descargas de las operaciones mineras ubicados en Rinconada y Lunar de Oro. El cuarto punto corresponde a río Antauta antes de confluencia con el río Crucero, cuyo valor excede el PEC, probablemente sea por la descarga de las operaciones mineras de la mina San Rafael.

Cadmio (Cd)

Con respecto a Cd, un 92.31% de las muestras se encuentran por debajo de los valores de TEC y solo un punto de muestreo excede el valor de PEC. Este punto de muestreo (RChac2) se ubica a un kilómetro aguas abajo de la confluencia de los ríos Azufrini y Pataqueña, recibe las descargas líquidas con alto contenido de material de sólidos suspendidos de las operaciones mineras de Aruntani SAC y que esta concentración probablemente tenga efectos biológicos en los organismos acuáticos que vive en este río.

Cromo (Cr)

El elemento Cr, 96.15% de las muestras no supera el valor de TEC y solo un 3.85% supera el valor de PEC. La muestra que supera el valor de PEC (111 mg/kg), se ubica en el punto de muestreo (RAzuf1) con una concentración de 137.60 mg/kg, esto definitivamente tiene efectos en los organismos acuáticos de este río y aguas abajo del mismo. Este punto se ubica dentro de las operaciones mineras de Aruntani SAC.

Cobre (Cu)

Un 80% de las muestras (20 muestras) se encuentran por debajo del valor de TEC (31.60 mg/kg) y 16% (entre TEC y PEC) y un 4% (>PEC). La muestra (RAzuf1) que supera el valor de PEC se encuentra dentro en las operaciones mineras de Aruntani SAC, en el río Azufrini. Esta concentración afectaría a los organismos acuáticos de habitan en dicho río.

Mercurio (Hg)

El Hg es un metal pesado altamente contaminante y bioacumulativos en el organismo de los seres vivos. Un 71.43% de las muestras está por debajo del valor de TEC y un 11.54% entre TEC y PEC y un 14.29% supera el valor de PEC.

En la cuenca Azángaro, el 14.29% muestras (QLuor1 y RLari1) superan el valor de PEC. La primera muestra se ubica en la quebrada Lunar de Oro que recibe las descargas de las operaciones de la mina Rinconada y Lunar de Oro, con 3.88 mg/kg de concentración, supera en un 266% el valor de PEC (1.06 mg/kg); esta concentración llama la atención para la calidad de los sedimentos, el agua y la vida acuática de seres vivos en la Laguna Rinconada y efluentes aguas abajo como el río Grande, Crucero, Azángaro, Ramis y posterior descarga al Lago Titicaca. El punto RLari1 contiene una concentración de 10.50 mg/kg, superior en 890% del valor de PEC que es de 1.06 mg/kg de Hg. Este punto, es muy preocupante en vista que no hay presencia de actividad minera en la parte alta de esta microcuenca, probablemente su origen sea geogénico, que necesita mayores estudios a detalle.

Plomo (Pb)

El elemento Pb está presente en todas las muestras; sin embargo, el 88.46% (23 muestras) no supera el valor de TEC (35.80 mg/kg) y el 11.54% de muestras (3 puntos) se encuentran entre los valores de TEC y PEC. Esto significa que no hay probablemente efectos en los organismos acuáticos que habitan en los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis.

Níquel (Ni)

Un 92.31% de muestras (24 puntos) se encuentra por debajo del valor de TEC (22.70 mg/kg) y solo un 7.69% de muestras (2 puntos) se encuentran entre los valores de TEC y PEC, no existe ninguna muestra que supere el valor de PEC (48.60 mg/kg). Se concluye que níquel no afecta a los organismos acuáticos de los diferentes afluentes de la cuenca del río Ramis.

Zinc (Zn)

El elemento Zn, en un 80.77% de muestras (21 puntos) no supera el valor de TEC (121 mg/kg) y un 19.23% (5 muestras) se encuentra entre TEC y PEC y ninguna muestra supera el valor de PEC (459 mg/kg). Se concluye que zinc no afecta a los organismos acuáticos que habitan en los afluentes de la cuenca del río Ramis.

4.2.2 Factor de Enriquecimiento

Los valores de Factor de Enriquecimiento (EF) calculados para los metales pesados seleccionados para la cuenca del río Ramis se muestran en la Tabla 27.

Estos valores han sido contrastados con los valores asignados por (Alexander et al., 1993) para clasificar los puntos de muestreo de acuerdo a proveniencia y calidad del sedimento.

Tabla 27

Factor de Enriquecimiento (FE) de la cuenca del río Ramis

Muestra	Código	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
1	RChac3	4.99	0.41	0.02	0.16	N.C.	0.35	0.33	0.20
2	ROcuv1	2.92	0.81	0.02	0.05	2.43	1.05	0.32	1.12
3	RChac2	1.43	0.04	0.01	0.32	N.C.	0.08	0.17	0.09
4	RAzuf1	4.15	0.01	0.02	0.06	0.01	0.01	0.02	0.01
5	RPata2	4.00	0.31	0.02	0.03	N.C.	1.28	0.29	0.50
6	RChac4	5.60	0.67	0.02	0.35	0.12	0.21	0.39	0.35
7	RChaq1	0.23	0.06	0.01	0.01	N.C.	0.05	0.26	0.15
8	RChaq2	0.20	5.32	0.01	0.03	N.C.	0.33	0.30	0.88
9	RLlal1	3.19	0.62	0.01	0.20	0.37	0.28	0.39	0.36
10	RMaca2	0.31	0.04	0.01	0.04	N.C.	0.08	0.14	0.24
11	RStro1	0.56	0.01	0.01	0.02	0.03	0.08	0.30	0.16
12	RAYav1	1.25	0.14	0.01	0.04	0.21	0.16	0.31	0.23
13	RPuca1	3.34	0.48	0.01	0.02	N.C.	0.10	0.34	0.18
14	RPuca2	2.27	0.11	0.02	0.02	N.C.	0.13	0.31	0.19
15	RRami1	1.76	0.10	0.01	0.03	N.C.	0.16	0.35	0.27
16	RRami2	2.43	0.12	0.01	0.02	N.C.	0.19	0.37	0.29
17	LRinc1	3.81	0.07	0.01	0.03	0.22	0.09	0.38	0.22
18	QLuor1	64.45	0.13	0.01	0.03	7.72	0.26	0.35	0.13
19	RGran2	0.74	0.04	0.01	0.03	0.12	0.08	0.39	0.13
20	RCruc2	2.31	1.06	0.01	0.03	0.18	0.13	0.49	2.12
21	RAnta3	1.76	0.30	0.01	0.07	0.15	0.18	0.33	0.44
22	RCruc3	1.72	0.55	0.02	0.04	N.C.	0.34	0.41	0.84
23	RAzan2	1.07	0.14	0.02	0.02	N.C.	0.18	0.35	0.33
24	RLari1	0.55	0.05	0.01	0.01	50.29	0.10	0.25	0.10
25	RGran1	1.57	0.18	0.02	0.02	0.55	0.14	0.35	0.24
26	RCruc5	1.60	0.18	0.01	0.02	0.53	0.20	0.36	0.47

N.C. No calculado.

a) Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento

En la Tabla 28, se analizó el Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento. En ese sentido, para As se determinó su proviene se atribuye de origen geogénico o antropogénico en un 78.08% y en menor porcentaje de origen geogénico o únicamente de origen antropogénico; sin

embargo, existe seis (06) puntos de muestreo críticos que corresponde a origen únicamente antropogénico (QLuor1 ubicado en la cuenca Azángaro, que recibe las descargas de los efluentes de la mina Rinconada y Lunar de Otro y RAZuf1, RPata2 ubicado dentro de las operaciones mineras de Aruntani SAC, RChac1, RChac2, RChac4, ubicado en el río Chacapalca de la Pucará, que recibe la descarga de los efluentes de las operaciones mineras de Aruntani SAC), los cuales contaminan la calidad de sedimentos de sus afluentes.

Tabla 28

Número de muestras y % de cada clase de Factor de Enriquecimiento (FE) en relación de proveniencia del sedimento

Clases de FE	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
FE > 10	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
%	3.85	0.00	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00
$1 \leq FE \leq 10$	19.00	2.00	0.00	0.00	2.00	2.00	0.00	2.00
%	73.08	7.69	0.00	0.00	14.29	7.69	0.00	7.14
FE < 1	6.00	24.00	26.00	26.00	11.00	24.00	26.00	26.00
%	23.08	92.31	100.00	100.00	78.57	92.31	100.00	92.86

Para Cd, Cr y Cu muestran un origen geogénico en gran mayoría de los puntos de muestreo a nivel de la cuenca del río Ramis. El Hg tiene origen geogénico en 78.57% y de origen geogénico o antropogénico en un 14.29%. Se debe resaltar que el punto de muestreo QLuor1, ubicado en la quebrada lunar de Oro que recibe las descargas de la Mina Rinconada y Lunar de Oro, es de origen antropogénico. Mientras que el punto de muestreo RLari1, ubicado en el río Larimayo a 50 metros aguas arriba del puente palmeras presenta un origen geogénico, en vista que no existe actividad minera en la parte alta de esta microcuenca. Los otros metales pesados como Pb, Ni y Zn todos ellos muestran un origen geogénico en su gran mayoría de los puntos de muestreo en la cuenca del río Ramis.

b) Factor de Enriquecimiento (FE) en relación con la calidad de sedimento

En la Tabla 29 se analizó la calidad de sedimentos de los puntos de muestreo en función al Factor de Enriquecimiento (FE), donde el As el 34.62% se encuentran con $FE < 1.5$ y el 34.62% están entre $1.5 \leq FE < 3$; es decir, se encuentra entre la clase sin enriquecimiento y enriquecimiento menor (calidad de sedimento buena). El Cd (96.16%), Cr (100%) y Cu (100%) tiene un $FE < 1.5$, clasificado como la clase sin enriquecimiento, por lo tanto, sus sedimentos son de buena calidad.

Tabla 29

Número de muestras y % del Factor de Enriquecimiento (FE) en relación con la calidad de sedimento

Clases de FE	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
FE < 1.5	9.00	25.00	26.00	26.00	11.00	26.00	26.00	25.00
%	34.62	96.15	100.00	100.00	78.57	100.00	100.00	96.15
1.5 ≤ FE < 3	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
%	34.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.85
3 ≤ FE < 5	6.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
%	23.08	0.00	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00
5 ≤ FE < 10	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
%	3.85	3.85	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00
10 ≤ FE < 25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25 ≤ FE < 50	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
%	3.85	0.00	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00

Del total de las muestras de los puntos; el Hg en un 78.57% se encuentra en FE < 1.5, mientras el 7.14% están en 3 < FE < 5, el 7.14% entre 5 < FE < 10 y el 7.14% entre 25 < FE < 50; existe dos puntos de muestreo (QLuor1 y RLari1) que representa valores excepcionalmente de mayor concentración de Hg en el sedimento, el primero corresponde al punto de muestreo quebrada Lunar de Oro que recibe las descargas de los efluentes mineros de Rinconada y Lunar de Oro con FE>50 (Enriquecimiento extremadamente severo), con una concentración de 3.88 mg/kg, y el segundo en sedimentos del río Larimayo ubicado a 50 metros aguas arriba del puente Palmeras unión con río Crucero cerca al poblado de San Antón, este río no recibe efluentes de la actividad minera en la parte alta de ésta microcuenca; sin embargo, nace la necesidad de mayor investigación, puesto que el FE>50 (Enriquecimiento extremadamente severo) y con una concentración excesiva de 10.50 mg/kg. Pb (100%), Ni (100%) y Zn (96.15%) corresponde a la clase (FE<1.5) de sedimentos sin enriquecimiento.

Los FE de metales pesados pueden ser valiosos y han sido utilizados como un indicador indirecto para la evaluación de la contaminación o toxicidad de los sedimentos. Sin embargo, no es suficiente usar solo el FE para la evaluación de la toxicidad del sedimento en un sitio en particular. Se requiere otros índices de grado de contaminación en el sedimento y la comparación con las pautas de

calidad de sedimento que son útiles para evaluar la toxicidad del sedimento para el sitio en particular (Elias et al., 2018).

4.2.3 Índice de Geoacumulación

Los valores de Índice de Geoacumulación (Igeo) calculados para los metales pesados seleccionados para la cuenca del río Ramis se muestran en la Tabla 30. El Índice de Geoacumulación es índice cuantitativo para investigar la contaminación por metales pesados en sedimentos acuáticos y ha sido ampliamente utilizado para evaluar el grado de contaminación en sedimentos superficiales (Müller, 1979).

Tabla 30

Índice de Geoacumulación (Igeo) de la cuenca del río Ramis

Muestra	Código	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
1	RChac3	5.50	1.89	-2.43	0.58	N.C.	1.67	1.58	0.85
2	ROcuv1	4.59	2.74	-2.68	-1.40	4.32	3.11	1.38	3.21
3	RChac2	4.57	-3.91	2.68	7.25	N.C.	3.27	2.52	4.65
4	RAzuf1	9.37	-2.91	6.52	8.01	-3.91	3.57	2.49	3.74
5	RPata2	4.23	0.57	-3.69	-2.85	N.C.	2.59	0.47	1.25
6	RChac4	5.43	2.37	-2.88	1.41	-0.17	0.71	1.59	1.42
7	RChaq1	1.48	-0.43	-3.18	-2.52	N.C.	-0.81	1.64	0.84
8	RChaq2	1.92	6.62	-2.53	-0.95	N.C.	2.62	2.49	4.03
9	RLlal1	4.25	1.89	-3.72	0.23	1.15	0.75	1.22	1.08
10	RMaca2	0.05	-2.75	-4.95	-2.93	N.C.	-1.94	-1.10	-0.34
11	RStro1	4.03	-1.75	-2.59	-0.79	-0.17	1.17	3.12	2.20
12	RAYav1	3.74	0.57	-2.87	-1.41	1.15	0.79	1.74	1.31
13	RPuca1	3.94	1.15	-4.77	-3.19	N.C.	-1.08	0.65	-0.27
14	RPuca2	3.87	-0.43	-2.92	-2.82	N.C.	-0.25	0.99	0.26
15	RRami1	3.66	-0.43	-3.24	-2.37	N.C.	0.16	1.35	0.97
16	RRami2	3.85	-0.43	-3.66	-3.03	N.C.	0.16	1.13	0.77
17	LRinc1	5.27	-0.43	-2.93	-1.97	1.15	-0.13	1.95	1.15
18	QLuor1	9.49	0.57	-4.01	-1.70	6.43	1.51	1.96	0.49
19	RGran2	3.81	-0.43	-1.97	-1.07	1.15	0.68	2.87	1.34
20	RCruc2	5.82	4.69	-1.65	-0.50	2.15	1.67	3.59	5.69
21	RAnta3	4.70	2.15	-2.76	-0.05	1.15	1.38	2.27	2.70
22	RCruc3	4.01	2.37	-2.79	-1.56	N.C.	1.67	1.94	2.98
23	RAzan2	2.49	-0.43	-3.55	-3.45	N.C.	-0.11	0.89	0.79
24	RLari1	1.35	-2.17	-4.09	-3.95	7.87	-1.09	0.23	-1.09
25	RGran1	2.66	-0.43	-3.78	-3.35	1.15	-0.83	0.47	-0.05
26	RCruc5	2.75	-0.43	-4.09	-3.28	1.15	-0.24	0.59	1.00

En la Tabla 31 se observa el % de muestras por cada parámetro clasificados de acuerdo a la calidad de sedimento de las 26 muestras recolectadas.

Respecto al Índice de Geoacumulación de la calidad de sedimentos en la cuenca del río Ramis, podemos indicar que, respecto al As un 26.92% de las muestras se

encuentra altamente a muy altamente contaminado y un 23.08% altamente contaminado. Respecto al Cd (53.85%), Cr (92.31%) y Cu (80.77%) se encuentra en la clase de no contaminado. Mientras Hg (50.00%) se encuentra moderadamente contaminado. El Pb (34.62%) se encuentra en la clase de no contaminado. Ni (42.31%) y Zn (26.92%) se encuentra entre no contaminado a moderadamente contaminado.

Tabla 31

Número de muestras y % de cada clase de Índice de Geoacumulación (Igeo) en relación a la calidad de sedimento

Igeo	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Clase Igeo	Calidad de sedimento
Igeo < 0 %	0 0	14 53.85	24 92.31	21 80.77	3 21.43	9 34.62	1 3.846	4 15.38	0	No contaminado
0 ≤ Igeo < 1 %	1 3.85	3 11.54	0 0.00	2 7.69	0 0.00	6 23.08	7 26.92	7 26.92	1	No contam. a moderad. Contaminado
1 ≤ Igeo < 2 %	3 11.54	3 11.54	0 0.00	1 3.85	7 50.00	6 23.08	11 42.31	7 26.92	2	Moderad. contaminado
2 ≤ Igeo < 3 %	3 11.54	4 15.38	1 3.85	0 0.00	1 7.14	2 7.69	5 19.23	3 11.54	3	Moderad. a altamente contaminado
3 ≤ Igeo < 4 %	6 23.08	0 0.00	0 0.00	0 0.00	0 0.00	3 11.54	2 7.69	2 7.69	4	Altamente contaminado
4 ≤ Igeo < 5 %	7 26.92	1 3.85	0 0.00	0 0.00	1 7.14	0 0.00	0 0.00	2 7.69	5	Altamente a muy altam. contaminado
5 ≤ Igeo %	6 23.08	1 3.85	1 3.85	2 7.69	2 14.29	0 0.00	0 0.00	1 3.85	6	Muy altam. contaminado

4.2.4 Índice de Carga de Contaminación

Según los criterios de (Hakanson, 1980; Tomlinson et al., 1980) se determinaron el Índice de Carga de Contaminación (PLI). Del total de 26 muestras recolectadas, 25 muestras no superan el valor de 1 (no contaminado) y una muestra (RCruc2) supera el valor de uno (indica contaminado), en el río Crucero afluente del río Ramis (Tabla 32).

Tabla 32

Índice de Carga de Contaminación (PLI) en la cuenca del río Ramis

Muestra	Código	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	PLI
1	RChac3	4.54	0.50	0.11	1.29	N.C.	0.48	0.13	0.25	0.47
2	ROcuv1	2.41	0.90	0.09	0.33	3.60	1.29	0.12	1.27	0.68
3	RChac2	2.38	0.10	0.11	4.56	N.C.	0.21	0.13	0.22	0.35
4	RAzuf1	66.07	0.20	1.53	7.72	0.40	0.25	0.12	0.11	0.83
5	RPata2	1.88	0.20	0.05	0.12	N.C.	0.91	0.06	0.33	0.23
6	RChac4	4.31	0.70	0.08	2.30	0.16	0.25	0.13	0.37	0.42
7	RChaq1	0.28	0.10	0.06	0.15	N.C.	0.09	0.14	0.25	0.13
8	RChaq2	0.38	13.30	0.10	0.45	N.C.	0.92	0.25	2.24	0.74
9	RLlal1	1.90	0.50	0.04	1.01	0.40	0.25	0.10	0.29	0.33
10	RMaca2	0.10	0.02	0.02	0.11	N.C.	0.04	0.02	0.11	0.05
11	RStro1	1.63	0.04	0.10	0.50	0.16	0.34	0.38	0.63	0.28
12	RAyav1	1.33	0.20	0.08	0.33	0.40	0.26	0.15	0.34	0.28
13	RPuca1	1.54	0.30	0.02	0.09	N.C.	0.07	0.07	0.11	0.13
14	RPuca2	1.46	0.10	0.08	0.12	N.C.	0.13	0.09	0.16	0.16
15	RRami1	1.27	0.10	0.06	0.17	N.C.	0.17	0.11	0.27	0.18
16	RRami2	1.45	0.10	0.05	0.11	N.C.	0.17	0.10	0.23	0.16
17	LRinc1	3.85	0.10	0.08	0.22	0.40	0.14	0.17	0.30	0.26
18	QLuor1	71.93	0.20	0.04	0.27	15.52	0.43	0.17	0.19	0.65
19	RGran2	1.40	0.10	0.15	0.41	0.40	0.24	0.32	0.35	0.31
20	RCruc2	5.64	3.48	0.19	0.61	0.80	0.48	0.53	7.10	1.16
21	RAnta3	2.60	0.60	0.09	0.83	0.40	0.39	0.21	0.89	0.49
22	RCruc3	1.61	0.70	0.08	0.29	N.C.	0.48	0.17	1.09	0.42
23	RAzan2	0.56	0.10	0.05	0.08	N.C.	0.14	0.08	0.24	0.13
24	RLari1	0.26	0.03	0.03	0.06	42.00	0.07	0.05	0.06	0.14
25	RGran1	0.63	0.10	0.04	0.08	0.40	0.08	0.06	0.13	0.13
26	RCruc5	0.67	0.10	0.03	0.09	0.40	0.13	0.07	0.27	0.14

N.C. No calculado.

El Índice de Carga de Contaminación (en inglés *Pollution Load Index PLI*) se utiliza para determinar el nivel de contaminación de sedimentos por metales pesados, propuesto por (Tomlinson et al., 1980). A continuación se presenta el número de muestras en % por cada parámetro y categoría de contaminación propuesto por (Hakanson, 1980; Tomlinson et al., 1980).

El Factor de Contaminación (FC) de las diferentes muestras tomadas en la cuenca del río Ramis, respecto al As, el 50.00% de las muestras se encuentran en la categoría de contaminación moderada. Con respecto a Cd(92.31%), Cr(96.15%), Cu(80.77%), Hg(78.57%), Pb(96.15%), Ni(100%) y Zn(84.62%) se encuentran en la categoría de baja contaminación de acuerdo al factor de contaminación.

Tabla 33

Número de muestras y % de cada clase de Factor de Contaminación (FC) en relación a la categoría de contaminación

FC	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Categoría
FC < 1	7	24	25	21	11	25	26	22	Baja
%	26.92	92.31	96.15	80.77	78.57	96.15	100	84.62	contaminación
$1 \leq FC < 3$	13	0	1	3	0	1	0	3	Contaminación
%	50.00	0.00	3.85	11.54	0.00	3.85	0.00	11.54	moderada
$3 \leq FC < 6$	4	1	0	2	1	0	0	0	Contaminación
%	15.38	3.85	0.00	7.69	7.14	0.00	0.00	0.00	considerable
FC ≥ 6	2	1	0		2	0	0	1	Muy alta
%	7.69	3.85	0.00	0.00	14.29	0.00	0.00	3.85	contaminación

4.2.5 Riesgo Ecológico Potencial

Los valores de Riesgo Ecológico Potencial (Ei) e Índice de Riesgo (IR) calculados para los metales pesados seleccionados para la cuenca del río Ramis se muestran en la Tabla 34 y 35.

Los puntos de muy alto riesgo ecológico, respecto a As son dos puntos de muestreo (7.69%), para Cd un punto (3.85%) y para el caso de Hg dos puntos (14.29%), respectivamente.

El riesgo ecológico se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un efecto ecológico no deseado. En la mayoría de los casos se considera la evaluación de las consecuencias de un evento no deseado conjuntamente con la estimación de su ocurrencia. Por lo tanto, los puntos de muestreo con dicho riesgo ecológico para As son RAzuf1 y QLuor1; para Cd es RChaq2, para Hg son RLar1 y QLuor1.

Tabla 34

Índice de Riesgo Potencial (Ei) en la cuenca del río Ramis

Muestra	Código	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	IR
1	RChac3	45.40	15.00	0.22	6.44	N.C.	2.39	0.66	0.25	70.35
2	ROcuv1	24.07	27.00	0.18	1.64	144.00	6.46	0.58	1.27	205.19
3	RChac2	23.80	3.00	0.21	22.80	N.C.	1.04	0.63	0.22	51.70
4	RAzuf1	660.67	6.00	3.06	38.60	16.00	1.27	0.62	0.11	726.33
5	RPata2	18.80	6.00	0.09	0.60	N.C.	4.53	0.31	0.33	30.65
6	RChac4	43.13	21.00	0.16	11.50	6.40	1.23	0.67	0.37	84.45
7	RChaq1	2.78	3.00	0.13	0.75	N.C.	0.43	0.69	0.25	8.02
8	RChaq2	3.79	399.00	0.20	2.24	N.C.	4.62	1.24	2.24	413.33
9	RLlal1	19.00	15.00	0.09	5.07	16.00	1.26	0.51	0.29	57.22
10	RMaca2	1.03	0.60	0.04	0.57	N.C.	0.20	0.10	0.11	2.64
11	RStro1	16.33	1.20	0.19	2.50	6.40	1.69	1.92	0.63	30.87
12	RAyav1	13.33	6.00	0.16	1.63	16.00	1.30	0.74	0.34	39.50
13	RPuca1	15.40	9.00	0.04	0.47	N.C.	0.35	0.35	0.11	25.73
14	RPuca2	14.60	3.00	0.15	0.61	N.C.	0.63	0.44	0.16	19.59
15	RRami1	12.67	3.00	0.12	0.84	N.C.	0.84	0.56	0.27	18.29
16	RRami2	14.47	3.00	0.09	0.53	N.C.	0.84	0.48	0.23	19.64
17	LRinc1	38.47	3.00	0.15	1.10	16.00	0.69	0.85	0.30	60.56
18	QLuor1	719.33	6.00	0.07	1.33	620.80	2.14	0.86	0.19	1350.72
19	RGran2	14.00	3.00	0.30	2.06	16.00	1.20	1.62	0.35	38.52
20	RCruc2	56.40	104.40	0.37	3.05	32.00	2.39	2.65	7.10	208.37
21	RAnta3	26.00	18.00	0.17	4.17	16.00	1.96	1.07	0.89	68.26
22	RCruc3	16.13	21.00	0.17	1.47	N.C.	2.39	0.85	1.09	43.10
23	RAzan2	5.63	3.00	0.10	0.40	N.C.	0.70	0.41	0.24	10.47
24	RLari1	2.55	0.90	0.07	0.28	1680.00	0.35	0.26	0.06	4.48
25	RGran1	6.30	3.00	0.08	0.42	16.00	0.42	0.31	0.13	26.67
26	RCruc5	6.73	3.00	0.07	0.44	16.00	0.63	0.33	0.27	27.49

N.C. No calculado.

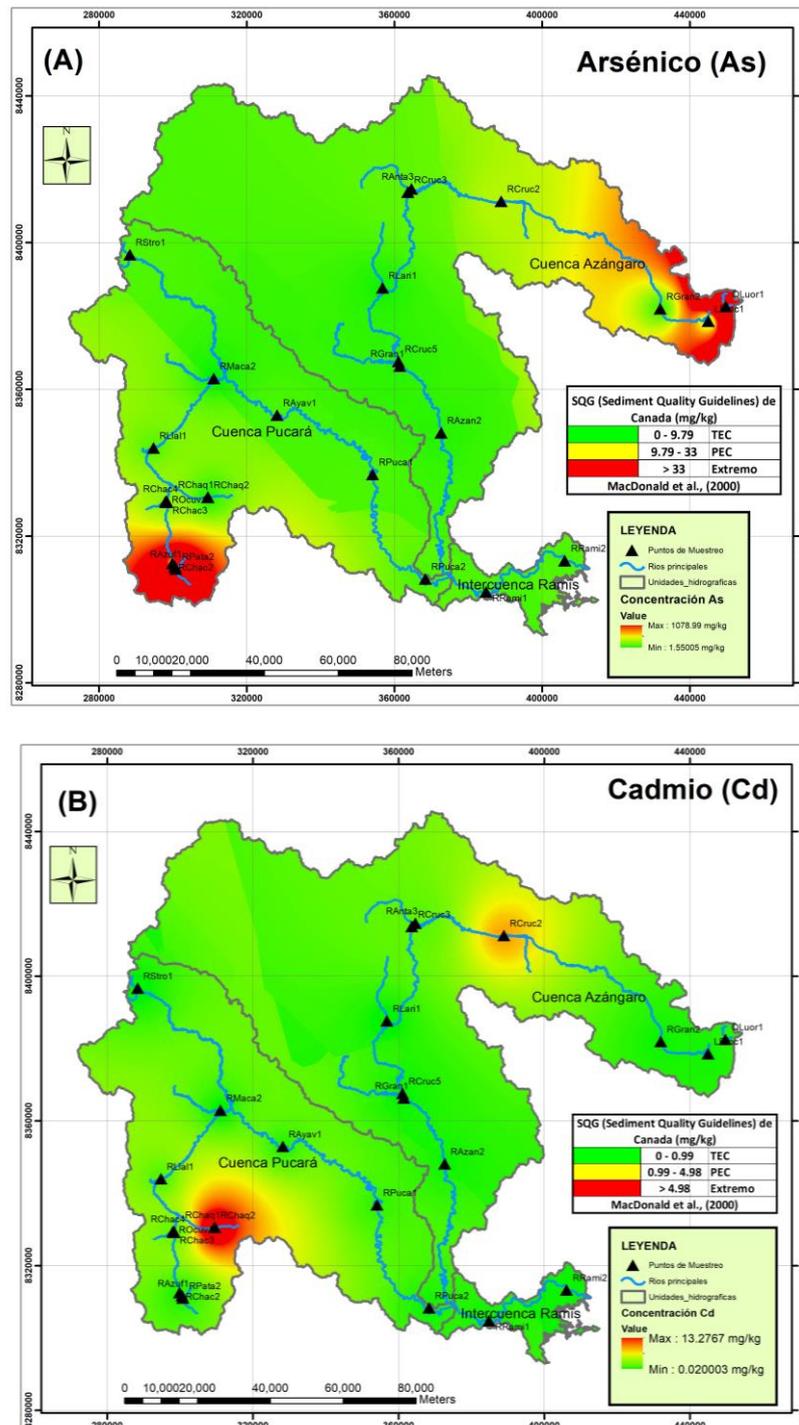
Tabla 35

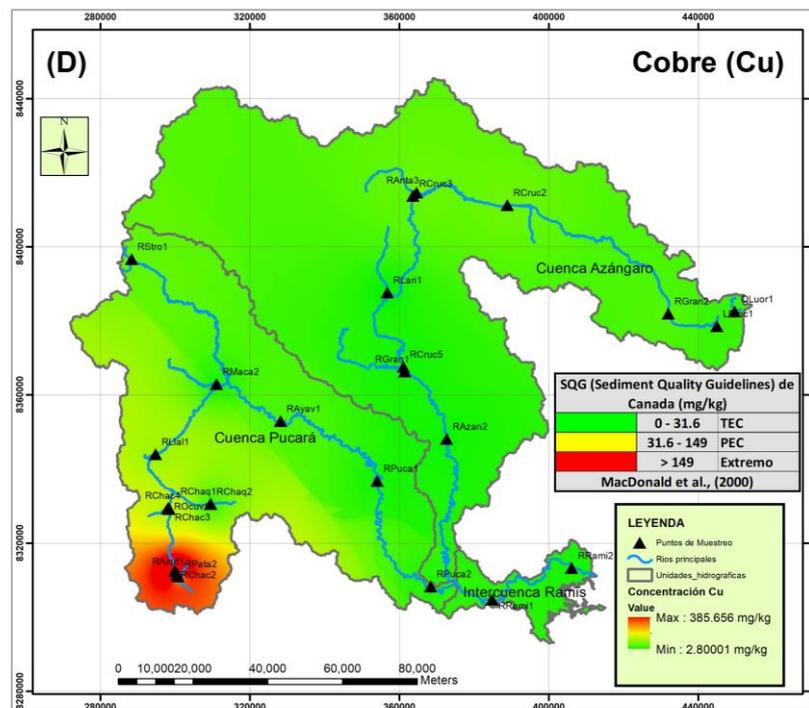
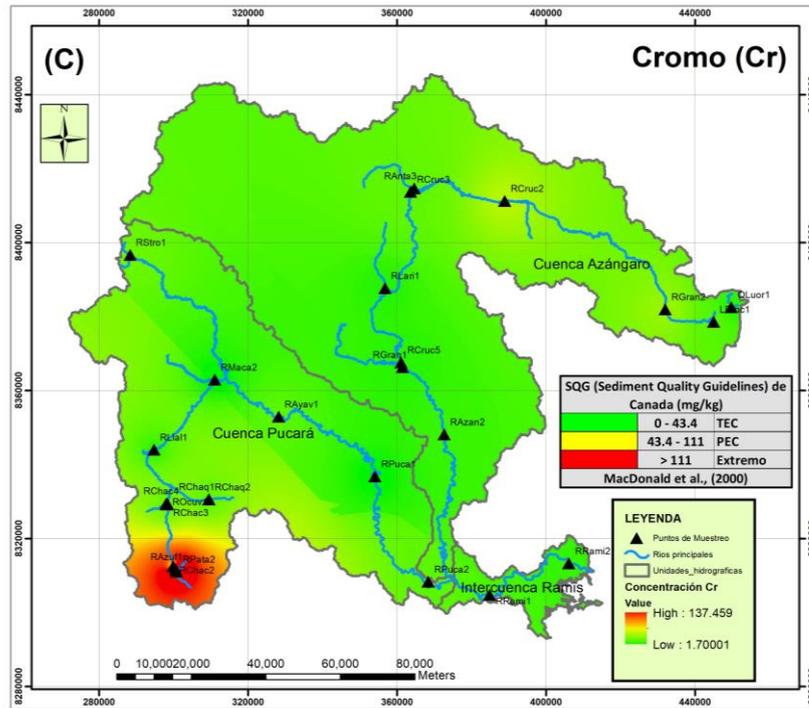
Número de muestras y % de cada clase de Índice de Riesgo Ecológico (Ei) y categoría de riesgo ecológico

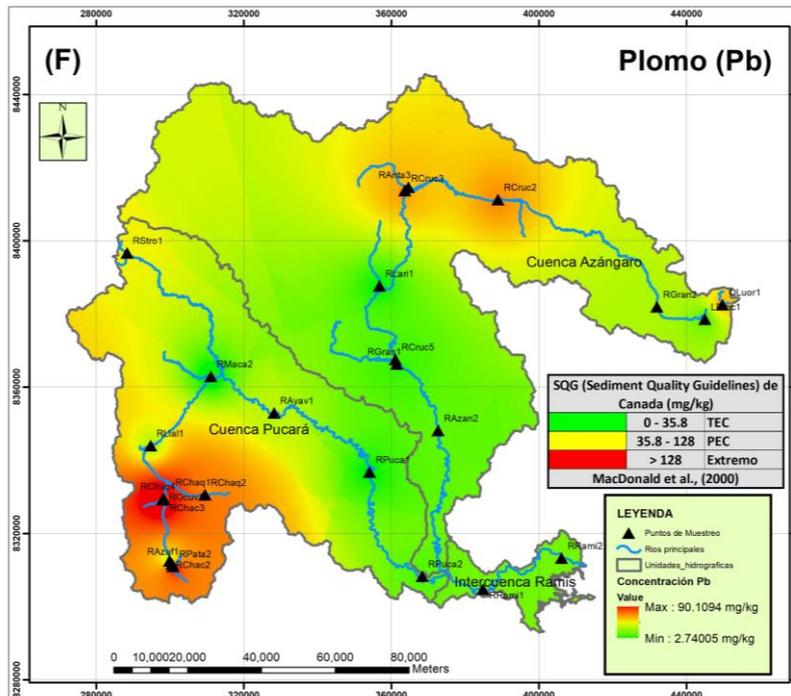
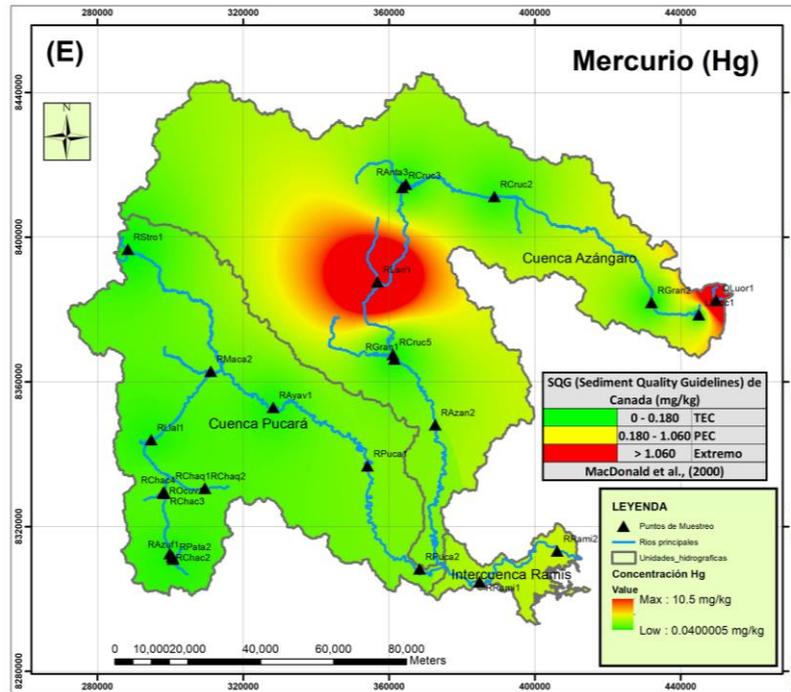
Ei	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn	Categoría
Ei ≤ 40	21	24	26	26	11	26	26	26	Riesgo ecológico bajo
%	80.7	92.31	100	100	78.57	100	100	100	
40 < Ei ≤ 80	3	0	0	0	0	0	0	0	Riesgo ecológico moderado
%	11.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
80 < Ei ≤ 160	0	1	0	0	1	0	0	0	Riesgo ecológico considerable
%	0.00	3.85	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00	
160 < Ei ≤ 320	0	0	0	0	0	0	0	0	Alto riesgo ecológico
%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
320 < Ei	2	1	0	0	2	0	0	0	Muy alto riesgo ecológico
%	7.69	3.85	0.00	0.00	14.29	0.00	0.00	0.00	

4.3 Análisis de variación espacial de la concentración de metales pesados

En el análisis espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en los 26 puntos de muestreo, se realizó mediante el método de Kriging Ordinario (KO), a través de los semivariogramas para predecir los valores de atributos en ubicaciones no muestreadas. El procesamiento se desarrolló en el software ArcGIS 10.4 (Figura 6).







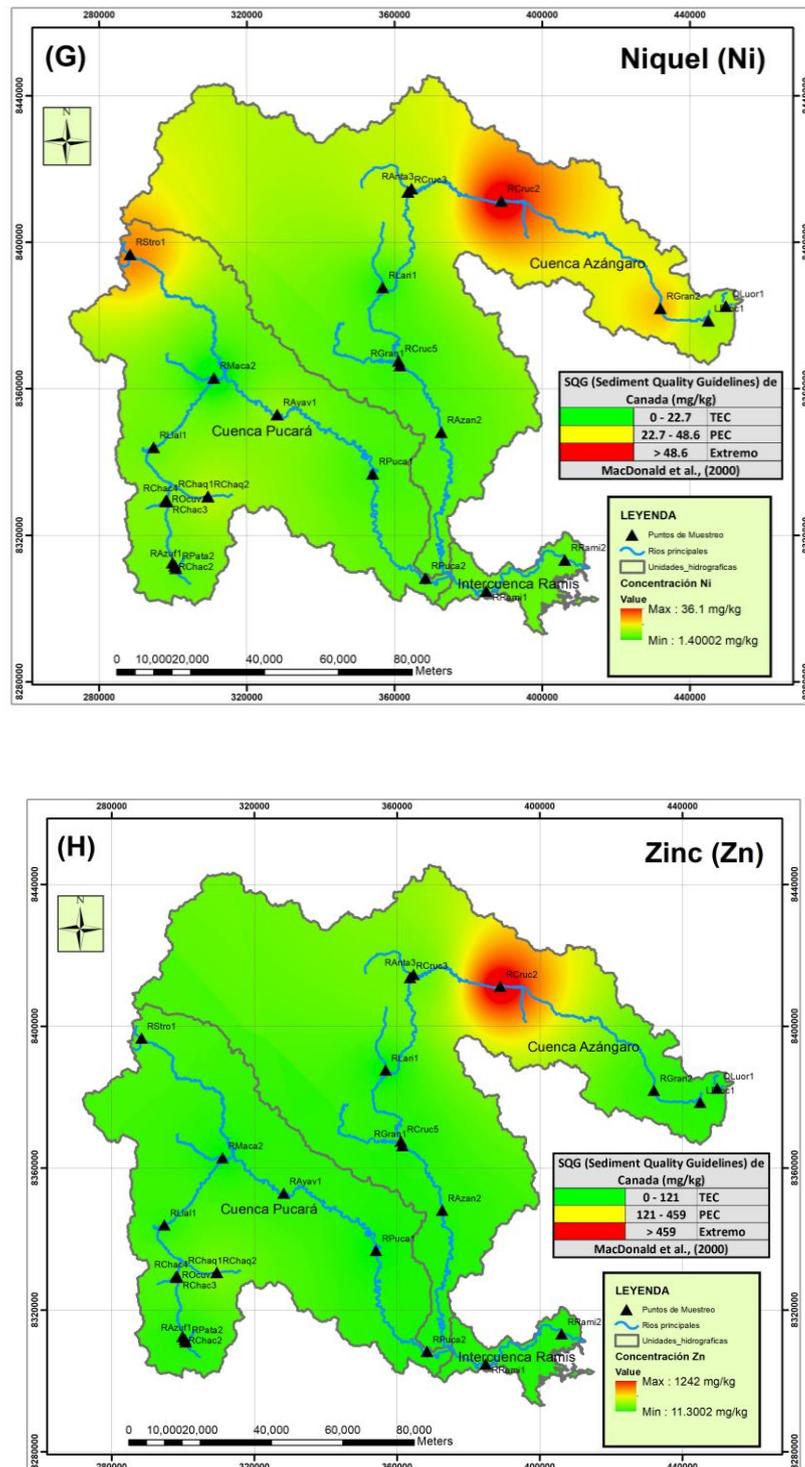


Figura 6. Distribución espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en la cuenca del río Ramis. (A) Arsénico; (B) Cadmio; (C) Cromo; (D) Cobre; (E) Mercurio; (F) Plomo; (G) Níquel y ((H) Zinc.

El As, la mayor concentración que supera el valor de PEC (>33mg/kg), se ubican en los puntos QLuor1, LRinc1, RGran2 de Rinconada y Ananea como zonas críticas de alta concentración que afecta la calidad del ecosistema acuático, donde

se evidencia la descarga de efluentes mineros con altas concentraciones de As. Por otro lado, se ubica en los puntos RAzuf1, RPata2 y RChac2 como zonas críticas en la cuenca Pucará, estos puntos también se relaciona con la actividad minera de la unidad Arasi SAC que descarga sus efluentes mineros a los ríos Azufrini y ésta al río Chacapalca (Figura 6A).

Respecto al Cd, los valores que superan el PEC (>4.98 mg/kg), los puntos que se identifican como zonas críticas son RCha1 (ubicado a 30 m aguas arriba de la descarga de la mina Las Águilas) y RCha2 (50 m aguas debajo de la misma mina), estas altas concentraciones se atribuirían a las fuentes naturales o en todo caso a efluentes mineros existentes (Figura 6B).

Del mismo modo los puntos RAzuf1, RPata2 y RChac2 de la cuenca Pucará, se identifican como zonas críticas, porque superan el valor de PEC (>111 mg/kg) de Cr, cuyas fuentes son la descarga de efluentes mineros en los ríos Azufrini y Chacapalca. Sin embargo, en la cuenca Azángaro, no se evidencia zonas críticas (Figura 6C).

Además, los puntos RAzuf1, RPata2 y RChac2 de la cuenca Pucará, se identifican como zonas críticas, porque superan el valor de PEC (>149 mg/kg) de Cu, cuyas fuentes son la descarga de efluentes mineros en los ríos Azufrini y Chacapalca. Sin embargo, en la cuenca Azángaro, no se evidencia zonas críticas (Ver Figura 6D).

Respecto a Hg, las zonas críticas se ubican en los puntos de QLuor1 y LRinc1, que superan los valores extremos de PEC (>1.060 mg/kg), estos se encuentran en las proximidades de las unidades mineras de Rinconada y Ananea. Por otro lado, en el punto RLari1 (Punto sobre el río Larimayo, ubicado a 50 m aguas arriba del puente Palmeras unión con el río Crucero), este es un afluente del río Crucero, donde se evidencia que supera el valor de TEC y se considera como zona crítica con alta concentración de Hg (Ver Figura 6E).

Las zonas críticas con Pb se ubican en RAzuf1, RPata2, RChac2, RCha3, RChac3 de la cuenca Pucará y RCruc2, RCruc3 de la cuenca Azángaro, que supera los

valores de PEC (>128 mg/kg), cuyas fuentes posibles sería naturales o algunas actividades industriales de las localidades próximas a los puntos de muestreo (Ver Figura 6F).

Asimismo, las zonas críticas con Ni se ubican en los Puntos RCruc2, RGran2 de la cuenca Azángaro y RStro1 (Río Santa Rosa) ubicado en la cuenca Pucará, superan los valores de PEC (>48.6 mg/kg) (Figura 6G).

Y, por último, para el caso de Zn, la zona crítica se ubica únicamente en RCruc2 (río Crucero) de la cuenca Azángaro donde supera el valor de PEC (>459 mg/kg), respectivamente (Figura 6H).

En consecuencia, los metales pesados más críticos que superan los valores de TEC y PEC son el As y Hg respectivamente. Los efectos en la salud de las personas de estos metales, como el As, en estudios recientes atribuyen como promotor del cáncer, aunque no alcanzó un consenso científico de ello. Respecto a Hg en estudios recientes demuestran como agente genotóxico, ha sido demostrado inducir la formación de ROS (radicales libres) que causa daño en el ADN de las células, un proceso que puede conducir al inicio de procesos cancerígenos, como la intoxicación por metilmercurio al comer pescado contaminado con Hg.

Teniendo estos resultados, se requiere realizar estudios integrales a nivel de la cuenca hidrográfica e identificar las diferentes fuentes de metales pesados en los distintos matrices ambientales, tal como recomienda Zhou et al. (2023) en su estudio *Modelización del transporte y el destino de los metales pesados a escala de cuenca hidrográfica: estado del arte y direcciones futuras*. Para mitigar los efectos de los metales pesados, indica que las estrategias requieren un monitoreo adecuado y modelos integrales basados en una sólida comprensión científica del sistema de cuencas. Sin embargo, falta una revisión exhaustiva de los estudios existentes sobre el destino de metales pesados a escala de cuenca y el modelo de transporte.

CONCLUSIONES

Se tiene las siguientes conclusiones:

- El nivel de concentración de metales pesados en sedimentos en los diferentes puntos de muestreo de afluentes de la cuenca del río Ramis-Puno, son diferentes en los 26 puntos de muestreo con concentraciones promedio de As=105.5 mg/kg; Cd=0.88 mg/kg; Cr=11.60 mg/kg; Cu=42.89 mg/kg; Hg=1.17 mg/kg; Pb=22.58 mg/kg; Ni=10.29 mg/kg y Zn=119.80 mg/kg, respectivamente. A nivel de la cuenca, el promedio de las concentraciones de los metales pesados en sedimentos, superan los valores de TEC y PEC, establecidos por SQG de Canadá. Concentración de As y Hg superan los valores de TEC y PEC, y Cu supera el valor de TEC.
- La evaluación de la calidad de sedimentos a través de los diferentes índices de contaminación y su comparación con los valores de Estándar de Calidad Ambiental; de manera que, el 42.31% de As se encuentra entre TEC y PEC, un 34.62% supera el valor de PEC (9 puntos); un 3.85% de Cd está entre PEC y TEC y un 3.85% sólo supera el valor PEC (1 punto); un 3.85% de Cr supera el valor de PEC (1 punto); el 16% de Cu está entre TEC y PEC y sólo el 4% supera de valor de PEC (1 punto); respecto al Hg un 14.29% está entre TEC y PEC y un 14.29% supera el valor de PEC; el Pb, Ni y Zn están entre PEC y TEC (11.54, 7.69 y 19.23%) y ninguno de ellos supera el valor de PEC. Además, se evaluó la proveniencia metales pesados en sedimentos mediante el Factor de Enriquecimiento, el As se encuentra en un 78.08% y Hg en 14.2%, ambos de origen geogénico o antropogénico, y la calidad del sedimento por las concentraciones de metales, enriquecimiento moderado por As (23.08%) y enriquecimiento extremadamente severo por Hg (7.14%). Según el Índice de Geoacumulación indica que los sedimentos, está altamente a muy altamente contaminado por As (26.92%), y moderadamente contaminado por Hg (50.00%), Ni (42.31%) y Zn (26.92%); además, el Índice de Carga de Contaminación de sedimentos revela que, está contaminada moderadamente por As (50%) y una contaminación baja por Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn; Riesgo Ecológico Potencial

(Ei) muestran que existe muy alto de riesgo ecológico por As (7.69%) y Hg (14.29%).

- El análisis espacial de la concentración de metales pesados mediante el método de Kriging; indica que, los puntos QLuor1, LRinc1, RGran2 que se ubican en la zona de Rinconada y Ananea, y RAzuf1, RPata2 y RChac2, se consideran como zonas críticas que afecta la calidad del ecosistema acuático el arsénico. Los puntos RChaq1 y RChaq2) son considerados como zonas críticas por cadmio; RAzuf1, RPata2 y RChac2 son considerados como zonas críticas por Cr y Cu. Respecto al Hg los puntos QLuor1 y LRinc1 que se encuentran en las proximidades de las unidades mineras de Rinconada y Ananea y el punto RLari1 ubicado sobre el río Larimayo, son consideradas zonas críticas. Y, por último, respecto a Pb (RAzuf1, RPata2, RChac2, RChac3, RCruc2 y RCruc3), Ni (RCruc2, RGran2 y RStro1) y Zn (RCruc2) son consideran como zonas críticas.

RECOMENDACIONES

Se tiene las siguientes recomendaciones:

- Es urgente tomar las acciones de remediación de los puntos de muestreo identificados como zonas críticas de alta concentración de los metales pesados que reduzca la concentración de los elementos como As, Cd y Hg, respectivamente.
- Se requiere hacer estudios sobre la biodisponibilidad de metales pesados que efectivamente ingresan a la cadena trófica acuática en las zonas de mayor concentración de elementos identificados como zonas críticas.
- Altas concentraciones de las principales especies químicas como por ejemplo requieren análisis más detallados como especiación en arsénico inorgánico, en sus estados de oxidación As (III) y As (V) y las especies orgánicas, ácidos metilarsonico (MMA) y dimetilarsinico (DMA).

BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Wahab, S., & Marikar, F. (2011). The environmental impact of gold mines: pollution by heavy metals. *Open Engineering*, 2(2), 304–313. <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0052-3>
- Alexander, C. R., Smith, R. G., Calder, F. D., Schropp, S. J., & Windom, H. L. (1993). The historical record of metal enrichment in two Florida estuaries. *Estuaries*, 16(3), 627–637. <https://doi.org/10.2307/1352800>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019(Cd). <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Ali, M. M., Ali, M. L., Islam, M. S., & Rahman, M. Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002>
- ANA. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales* (p. 92).
- ANA. (2017). *Fuentes contaminantes en la cuenca del Titicaca*.
- Apau, J., Osei-Owusu, J., Yeboah, A., Gyamfi, O., Darko, G., Akoto, O., & Dodd, M. (2022). Distribution of heavy metals in sediments, physicochemical and microbial parameters of water from River Subin of Kumasi Metropolis in Ghana. *Scientific African*, 15, e01074. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01074>
- Apitz, S. E., Barnati, A., Bernstein, A. G., Bocci, M., Delaney, E., & Montobbio, L. (2007). The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines. *Journal of Soils and Sediments*, 7(5), 326–341. <https://doi.org/10.1065/jss2007.08.246>
- Arambourou, H., Llorente, L., Moreno-Ocio, I., Herrero, Ó., Barata, C., Fuertes, I., Delorme, N., Méndez-Fernández, L., & Planelló, R. (2020). Exposure to heavy metal-contaminated sediments disrupts gene expression, lipid profile, and life history traits in the midge *Chironomus riparius*. *Water Research*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115165>
- Barenys, M., Boix, N., Farran-Codina, A., Palma-Linares, I., Montserrat, R., Curto, A., Gomez-Catalan, J., Ortiz, P., Deza, N., & Llobet, J. M. (2014). Heavy metal and metalloids intake risk assessment in the diet of a rural population living near a gold mine in the Peruvian Andes (Cajamarca). *Food and Chemical Toxicology*, 71(July),

- 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.06.018>
- Ben Salem, Z., Capelli, N., Laffray, X., Elise, G., Ayadi, H., & Aleya, L. (2014). Seasonal variation of heavy metals in water, sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etueffont, France). *Ecological Engineering*, *69*, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.072>
- Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Wang, X., & Zhu, H. (2019a). Spatial variation of heavy metal contamination in the riparian sediments after two-year flow regulation in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, *649*, 1004–1016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.401>
- Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Wang, X., & Zhu, H. (2019b). Spatial variation of heavy metal contamination in the riparian sediments after two-year flow regulation in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, *649*, 1004–1016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.401>
- Buchman, M. F. (2008). Screening Quick Reference Tables - Squirts. *Noaa*, *49*(6), 34.
- Carpio, B. O. (2016). Contaminacion por metales pesados en macrofitas de los principales rios tributarios del lago titicaca. In *Universidad Nacional del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6241>
- CCME, C. C. of M. of the E. (1999). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Chromium. *Canadian Environmental Quality Guidelines, Cd, 5*. ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/226/
- Cervi, E. C., & Poleto, C. (2018). Ecological risk assessment of freshwater sediments in Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, *48*, 1–20. <https://doi.org/10.5327/z2176-947820180234>
- Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Yang, K., Li, K., Peng, M., Yang, Z., Liu, F., Liu, Y., Bai, R., Cui, Y., Huang, Z., Li, L., Liao, Q., Luo, J., Jia, S., Pang, X., Yang, J., & Yin, G. (2015). Concentrations of toxic metals and ecological risk assessment for sediments of major freshwater lakes in China. *Journal of Geochemical Exploration*, *157*, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.010>
- Chibuike, G. U., & Obiora, S. C. (2014). Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*, *2014*. <https://doi.org/10.1155/2014/752708>
- Chui, H. B., Miramira, B. T., Olivera, P. L., & Jacay, J. H. (2009). *Determinación de metales pesados en sedimentos del río Chillón mediante la técnica de fluorescencia de rayos X*. *12*, 9–14.

- da Silva, C. P., da Silveira, E. L., & de Campos, S. X. (2017). Environmental pollution by heavy metals in the São João River basin, southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 76(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6890-4>
- de Deckere, E., de Cooman, W., Leloup, V., Meire, P., Schmitt, C., & von der Ohe, P. C. (2011). Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Journal of Soils and Sediments*, 11(3), 504–517. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0328-x>
- Decena, S. C. P., Arguelles, M. S., & Robel, L. L. (2018). Assessing heavy metal contamination in surface sediments in an urban river in the Philippines. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(5), 1983–1995. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75204>
- Dubovina, M., Krčmar, D., Grba, N., Watson, M. A., Rađenović, D., Tomašević-Pilipović, D., & Dalmacija, B. (2018). Distribution and ecological risk assessment of organic and inorganic pollutants in the sediments of the transnational Begej canal (Serbia-Romania). *Environmental Pollution*, 236, 773–784. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.014>
- Duffus, J. H. (2002). “heavy metals” - A meaningless term? (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Duwig, C., Archundia, D., Lehembre, F., Spadini, L., Morel, M. C., Uzu, G., Chincheros, J., Cortez, R., & Martins, J. M. F. (2014). Impacts of Anthropogenic Activities on the Contamination of a Sub Watershed of Lake Titicaca. Are Antibiotics a Concern in the Bolivian Altiplano? *Procedia Earth and Planetary Science*, 10, 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.062>
- Elias, M. S., Ibrahim, S., Samuding, K., Rahman, S. A., & Wo, Y. M. (2018). Assessment of toxic elements in sediments of Linggi River using NAA and ICP-MS techniques. *MethodsX*, 5(May), 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.001>
- Fashola, M. O., Ngole-Jeme, V. M., & Babalola, O. O. (2016). Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>
- Gammons, C. H., Slotton, D. G., Gerbrandt, B., Weight, W., Young, C. A., Mcneary, R. L., Ca, E., Caldero, R., & Tapia, H. (2006). *Mercury concentrations of fish , river water , and sediment in the Ri ´ o Ramis-Lake Titicaca watershed , Peru*. 368, 637–

648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.076>
- Gao, J. min, Sun, X. qian, Jiang, W. chao, Wei, Y. mei, Guo, J. song, Liu, Y. yuan, & Zhang, K. (2016). Heavy metals in sediments, soils, and aquatic plants from a secondary anabranch of the three gorges reservoir region, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10415–10425. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6587-3>
- Gao, L., Gao, B., Xu, D., Peng, W., & Lu, J. (2019). Multiple assessments of trace metals in sediments and their response to the water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 648, 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.112>
- Golden, N., Zhang, C., Potito, A., Gibson, P. J., Bargary, N., & Morrison, L. (2020). Use of ordinary cokriging with magnetic susceptibility for mapping lead concentrations in soils of an urban contaminated site. *Journal of Soils and Sediments*, 20(3), 1357–1370. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02537-7>
- Gray, J. S. (2002). Biomagnification in marine systems: The perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1–12), 46–52. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00323-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00323-X)
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hasimuna, O. J., Chibesa, M., Ellender, B. R., & Maulu, S. (2021). Variability of selected heavy metals in surface sediments and ecological risks in the Solwezi and Kifubwa Rivers, Northwestern province, Zambia. *Scientific African*, 12, e00822. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00822>
- Huanqui, R. (2018). *Determinación de metales pesados en pastos, fibra, carne y vísceras de alpacas en las comunidades del Distrito de Ananea - Puno*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Incahuanaco, V. (2018). *Identificación de puntos críticos por contaminación de metales tóxicos (Cadmio, Mercurio, Plomo y Arsénico) mediante análisis de sedimentos superficiales de la Subcuenca del Río Crucero, Cuenca Azángaro – Puno, 2018*. Universidad Peruana Unión.
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48,

- 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>
- Islam, M. S., Hossain, M. B., Matin, A., & Islam Sarker, M. S. (2018). Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh. *Chemosphere*, 202, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.077>
- Jia, Y., Wang, L., Qu, Z., & Yang, Z. (2018). Distribution, contamination and accumulation of heavy metals in water, sediments, and freshwater shellfish from Liuyang River, Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(7), 7012–7020. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1068-x>
- Kang, M., Tian, Y., Zhang, H., & Lan, Q. (2020). Distribution, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in River Sediments from Hai River and Its Tributaries, Tianjin, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4404-6>
- Kijowska-Strugała, M., Wiejaczka, Ł., Kozłowski, R., & Lekach, J. (2020). Metals content in sediments of ephemeral streams with small reservoirs (the Negev Desert). *International Journal of Sediment Research*, January, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.003>
- Kim, Y., & Kim, J. (2020). Bioinspired thiol functionalized carbon dots for rapid detection of lead (II) ions in human serum. *Optical Materials*, 99(January 2019), 109514. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109514>
- Kumar, S., Islam, A. R. M. T., Hasanuzzaman, M., Salam, R., Khan, R., & Islam, M. S. (2021). Preliminary assessment of heavy metals in surface water and sediment in Nakuvadra-Rakiraki River, Fiji using indexical and chemometric approaches. *Journal of Environmental Management*, 298(August), 113517. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113517>
- Kumar, V., Pandita, S., & Setia, R. (2022). A meta-analysis of potential ecological risk evaluation of heavy metals in sediments and soils. *Gondwana Research*, 103, 487–501. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.10.028>
- Kumar, V., Pandita, S., Singh Sidhu, G. P., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., & Setia, R. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Laino-guanes, R. M. (2015). *Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva , frontera. VI*, 61–74.

- Liang, Y., Wang, R., Sheng, G. D., Pan, L., Lian, E., Su, N., Tang, X., Yang, S., & Yin, D. (2023). Geochemical controls on the distribution and bioavailability of heavy metals in sediments from Yangtze River to the East China Sea: Assessed by sequential extraction versus diffusive gradients in thin-films (DGT) technique. *Journal of Hazardous Materials*, 452(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131253>
- Lin, L., Li, C., Yang, W., Zhao, L., Liu, M., Li, Q., & Crittenden, J. C. (2020). Spatial variations and periodic changes in heavy metals in surface water and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. *Chemosphere*, 240, 124837. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124837>
- Liu, P., Wu, Q., Hu, W., Tian, K., Huang, B., & Zhao, Y. (2023). Comparison of heavy metals in riverine and estuarine sediments in the lower Yangtze River: Distribution, sources, and ecological risks. *Environmental Technology and Innovation*, 30, 103076. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103076>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20–31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Machado, K. S., Ferreira, P. A., Rizzi, J., Figueira, R., & Froehner, S. (2017). Spatial and Temporal Variation of Heavy Metals Contamination in Recent Sediments from Barigui River Basin, South Brazil. *Environment Pollution and Climate Change*, 01(01), 1–9. <https://doi.org/10.4172/2573-458x.1000108>
- Miao, X., Hao, Y., Liu, H., Xie, Z., Miao, D., & He, X. (2021). Effects of heavy metals speciations in sediments on their bioaccumulation in wild fish in rivers in Liuzhou—A typical karst catchment in southwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112099. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112099>
- Mohammad Ali, B. N., Lin, C. Y., Cleophas, F., Abdullah, M. H., & Musta, B. (2015). Assessment of heavy metals contamination in Mamut river sediments using sediment quality guidelines and geochemical indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4190-y>

- Monge, K. (2018). *Determinación de la concentración de los metales pesados en los sedimentos del río Chili de la provincia de Arequipa región Arequipa*. 104. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6906>
- Monroy, M., Maceda-veiga, A., & Sostoa, A. De. (2014). Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment*, *The*, 487, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.134>
- Mora, A., Jumbo-flores, D., & González-merizalde, M. (2016). *Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador*. 32(4), 385–397. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>
- Moreno Terrazas, E., Argota Pérez, G., Alfaro Tapia, R., Aparicio Saavedra, M., Atencio Limachi, S., & Goyzueta Camacho, G. (2018). Cuantificación de metales en sedimentos superficiales de la bahía interior, lago Titicaca-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(1), 09–18. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.326>
- Müller, G. (1979). Schwermetalle in Den Sedimenten Des Rheins - Veränderungen Seit 1971. *Umsch. Wissensch. Techn.*, 79(24), 778–783.
- Navarrete-Rodríguez, G., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Lango-Reynoso, F. (2020). Geoaccumulation of heavy metals in sediment of the fluvial–lagoon–deltaic system of the palizada river, Campeche, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030969>
- Nguyen, B. T., Do, D. D., Nguyen, T. X., Nguyen, V. N., Phuc Nguyen, D. T., Nguyen, M. H., Thi Truong, H. T., Dong, H. P., Le, A. H., & Bach, Q. V. (2020). Seasonal, spatial variation, and pollution sources of heavy metals in the sediment of the Saigon River, Vietnam. *Environmental Pollution*, 256, 113412. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113412>
- Olarte, D. A. C., & Pacheco Tanaka, M. E. (2009). Contaminación de aguas y sedimentos por As, Pb y Hg de la cuenca del río Ramis, Puno -Perú. *Revista Investig. (Esc. Posgrado) V*, 5. <http://epg.unap.edu.pe/epgrd/investigacion/revistas/iv2009/3.pdf>
- Omwene, P. I., Öncel, M. S., Çelen, M., & Kobya, M. (2018). Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey). *Chemosphere*, 208, 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.031>
- Palacios-Torres, Y., de la Rosa, J. D., & Olivero-Verbel, J. (2020). Trace elements in

- sediments and fish from Atrato River: an ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental Pollution*, 256, 113290. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113290>
- Pari-Huaquisto, D. C., Alfaro-Alejo, R., Pilares-Hualpa, I., & Belizario, G. (2020). Seasonal variation of heavy metals in surface water of the Ananea river contaminated by artisanal mining, Peru. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 614(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012167>
- Patel, P., Raju, N. J., Reddy, B. C. S. R., Suresh, U., Sankar, D. B., & Reddy, T. V. K. (2018). Heavy metal contamination in river water and sediments of the Swarnamukhi River Basin, India: risk assessment and environmental implications. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2), 609–623. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0006-7>
- Patilla, P. B. (2015). *Calidad de agua y sedimentos del río Tambopata - Departamento de Madre de Dios 2014*. Universidad Nacional de Madre de Dios.
- Patle, A., Kurrey, R., Deb, M. K., Patle, T. K., Sinha, D., & Shrivastava, K. (2022). Analytical approaches on some selected toxic heavy metals in the environment and their socio-environmental impacts: A meticulous review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(9), 100545. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100545>
- Pérez, M. (2017). *Evaluación de riesgo ambiental en el área de influencia minera del río Crucero por Plomo y Mercurio- distrito de Ananea*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Persaud and Jaagumagi. (1993). Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario. *Weatherwise*, 46(5), 47–52. <https://doi.org/10.1080/00431672.1993.9930274>
- Proshad, R., Kormoker, T., Abdullah Al, M., Islam, M. S., Khadka, S., & Idris, A. M. (2022). Receptor model-based source apportionment and ecological risk of metals in sediments of an urban river in Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 423(PA), 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127030>
- Rachoń, D. (2015). Endocrine disrupting chemicals (EDCs) and female cancer: Informing the patients. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 16(4), 359–364. <https://doi.org/10.1007/s11154-016-9332-9>
- Rahman, M. S., Saha, N., & Molla, A. H. (2014). Potential ecological risk assessment of heavy metal contamination in sediment and water body around Dhaka export processing zone, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 71(5), 2293–2308.

- <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2631-5>
- Rivera, H., & Chira, J. (2008). Análisis correlacional y evolutivo de los metales pesados en sedimentos del río Santa entre Huaraz – Carhuaz, departamento de Ancash. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 11(21), 19–24.
- Rivera, H., Chira, J., Zambrano, K., & Petersen, P. (2007). Dispersión secundaria de los metales pesados en sedimentos de los ríos Chillón , Rímac y Lurín Departamento de Lima. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol 10, N°20, 19-25 (2007) UNMSM*, 10, 19–25.
- Rodríguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Jonathan, M. P., & Martínez-Tavera, E. (2018). Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148(August 2017), 1020–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.068>
- Sani, A., Idris, K. M., Abdullahi, B. A., & Darma, A. I. (2022). Bioaccumulation and health risks of some heavy metals in *Oreochromis niloticus*, sediment and water of Challawa river, Kano, Northwestern Nigeria. *Environmental Advances*, 7, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100172>
- Sanyal, T., Kaviraj, A., & Saha, S. (2015). Deposition of chromium in aquatic ecosystem from effluents of handloom textile industries in Ranaghat-Fulia region of West Bengal, India. *Journal of Advanced Research*, 6(6), 995–1002. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.12.002>
- Sciences, A., & Life, N. (2017). Evaluation of the status of heavy metal pollution in surface water and sediments of the Nil River (North Eastern Algeria). *Evaluation of the Status of Heavy Metal Pollution in Surface Water and Sediments of the Nil River (North Eastern Algeria)*, 3(2), 301–310. <https://doi.org/10.7508/pj.2017.02>
- Sharma, A., Kapoor, D., Wang, J., Shahzad, B., Kumar, V., Bali, A. S., Jasrotia, S., Zheng, B., Yuan, H., & Yan, D. (2020). Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: An overview. *Plants*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants9010100>
- Siddiqui, E., & Pandey, J. (2019). Assessment of heavy metal pollution in water and surface sediment and evaluation of ecological risks associated with sediment contamination in the Ganga River: a basin-scale study. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 10926–10940. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04495-6>

- Singh, H., Pandey, R., Singh, S. K., & Shukla, D. N. (2017). Assessment of heavy metal contamination in the sediment of the River Ghaghara, a major tributary of the River Ganga in Northern India. *Applied Water Science*, 7(7), 4133–4149. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0572-y>
- Smith, S. L., MacDonald, D. D., Keenleyside, K. A., Ingersoll, C. G., & Field, L. J. (1996). A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *Journal of Great Lakes Research*, 22(3), 624–638. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(96\)70985-1](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(96)70985-1)
- Sotero-solís, V., & Alva-astudillo, M. (2013). Contenido de metales pesados en agua y sedimento en el bajo Nanay. *Ciencia Amazonica (Iquitos)*, 3(1), 24–32.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environmental. In *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* (Vol. 101). <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4>
- Tejeda-Benitez, L., Flegal, R., Odigie, K., & Olivero-Verbel, J. (2016). Pollution by metals and toxicity assessment using *Caenorhabditis elegans* in sediments from the Magdalena River, Colombia. *Environmental Pollution*, 212, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.057>
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1–4), 566–575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, February, 175–192.
- Väänänen, K., Leppänen, M. T., Chen, X. P., & Akkanen, J. (2018). Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: From science to environmental management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147(June 2017), 430–446. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.064>
- Vardy, D. W. (2014). Toxicity of Metals Associated with Sediments from the Columbia River to Early Life Stages of White Sturgeon. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000262>
- Velásquez Ramírez, M. G., Barrantes, J. A. G., Thomas, E., Gamarra Miranda, L. A., Pillaca, M., Tello Peramas, L. D., & Bazán Tapia, L. R. (2020). Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon. *Catena*, 189(May 2019), 104454.

- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104454>
- Vu, C. T., Lin, C., Shern, C. C., Yeh, G., Le, V. G., & Tran, H. T. (2017). Contamination, ecological risk and source apportionment of heavy metals in sediments and water of a contaminated river in Taiwan. *Ecological Indicators*, 82(June), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.008>
- Wang, Jianxu, Feng, X., Anderson, C. W. N., Xing, Y., & Shang, L. (2012). Remediation of mercury contaminated sites - A review. *Journal of Hazardous Materials*, 221–222, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.035>
- Wang, Jiawei, Liu, R., Zhang, P., Yu, W., Shen, Z., & Feng, C. (2014). Spatial variation, environmental assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 87(1), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.048>
- Wang, X., Shi, Z., Shi, Y., Ni, S., Wang, R., Xu, W., & Xu, J. (2018). Distribution of potentially toxic elements in sediment of the Anning River near the REE and V-Ti magnetite mines in the Panxi Rift, SW China. *Journal of Geochemical Exploration*, 184(March 2017), 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.018>
- Wang, Y., Liu, R., Miao, Y., Jiao, L., Cao, L., Li, L., & Wang, Q. (2021). Identification and uncertainty analysis of high-risk areas of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 164(January), 112003. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112003>
- Wani, M. A., Wani, J. A., Bhat, M. A., Kirmani, N. A., Wani, Z. M., & Bhat, S. N. (2013). Mapping of Soil Micronutrients in Kashmir Agricultural Landscape Using Ordinary Kriging and Indicator Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(2), 319–329. <https://doi.org/10.1007/s12524-012-0242-3>
- Wei, X., Han, L., Gao, B., Zhou, H., Lu, J., & Wan, X. (2015). Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir: The impact of water impoundment. *Ecological Indicators*, 61, 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.018>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Xiao, H., Shahab, A., Xi, B., Chang, Q., You, S., Li, J., Sun, X., Huang, H., & Li, X. (2021). Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China. *Environmental Pollution*,

- 269(xxxx), 116189. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116189>
- Xie, H., Yang, X., Xu, J., & Zhong, D. (2023). Heavy metals pollution and potential ecological health risk assessment in the Yangtze River reaches. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109489. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109489>
- Xu, F., Liu, Z., Cao, Y., Qiu, L., Feng, J., Xu, F., & Tian, X. (2017). Assessment of heavy metal contamination in urban river sediments in the Jiaozhou Bay catchment, Qingdao, China. *Catena*, 150, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.004>
- Yajie, H., Zhen, L. I., Huichun, Y. E., Shiwen, Z., Zhiqing, Z., An, X., & Yuanfang, H. (2019). Mapping soil electrical conductivity using ordinary Kriging combined with back-propagation network. *Chinese Geographical Science*, 29(2), 270–282.
- Zahra, A., Hashmi, M. Z., Malik, R. N., & Ahmed, Z. (2014). Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 470–471, 925–933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.017>
- Zavala, B. and, & Guerrero, C. (2006). Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Ramis. *Ingemmet*, 32, 223.
- Zhang, Z., Lu, Y., Li, H., Tu, Y., Liu, B., & Yang, Z. (2018). Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. *Science of the Total Environment*, 645, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.026>
- Zhao, Q., Ding, S., Hong, Z., Ji, X., Wang, S., Lu, M., & Jing, Y. (2021). Impacts of water-sediment regulation on spatial-temporal variations of heavy metals in riparian sediments along the middle and lower reaches of the Yellow River. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 227, 112943. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112943>
- Zhao, X., Gao, B., Xu, D., Gao, L., & Yin, S. (2017). Heavy metal pollution in sediments of the largest reservoir (Three Gorges Reservoir) in China: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(26), 20844–20858. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9874-8>
- Zhou, L., Wu, F., Meng, Y., Byrne, P., Ghomshei, M., & Abbaspour, K. C. (2023). Modeling transport and fate of heavy metals at the watershed scale: State-of-the-art and future directions. *Science of the Total Environment*, 878(December 2022), 163087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163087>



- Zhu, H., Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Wang, J., & Wang, X. (2019). The spatial and vertical distribution of heavy metal contamination in sediments of the Three Gorges Reservoir determined by anti-seasonal flow regulation. *Science of the Total Environment*, 664, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.016>
- Zhu, X., Shan, B., & Tang, W. (2016). Heavy metal in sediments of Ziya River in northern China: distribution, potential risks, and source apportionment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(23), 23511–23521. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7561-9>
- Zhuang, S., Lu, X., Yu, B., Fan, X., & Yang, Y. (2021). Ascertain the pollution, ecological risk and source of metal(loid)s in the upstream sediment of Danjiang River, China. *Ecological Indicators*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107502>



ANEXOS



Anexo 1 Mapa de puntos de muestreo



Anexo 2 Informe de Ensayo No 2-0211/18 del laboratorio CERPER S.A.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 1/10

Solicitante : CHOQUECOTA RIVA, ALBERTO
 Domicilio legal : JR. JOSÉ DE LA MAR N° 180 - PUNO - PUNO - PUNO
 Producto declarado : SEDIMENTO DE RIO
 Lugar de Muestreo : SUBCUENCA PUCARÁ Y SUBCUENCA AZÁNGARO - PUNO
 Fecha de Muestreo : 2018-11-16, 17, 18
 Método de Muestreo : RM-085-2014-MINAM Guia para Muestreo de Suelos
 Acta de Inspección : 18AQ00470980606
 Cantidad de Muestras para el Ensayo : 6.5 Kilogramos – 26 Muestras de Sedimentos
 Forma de Presentación : Frascos de plástico, cerrados, refrigerados y preservados
 Identificación de la muestra : Según se indica
 Fecha de recepción : 2018-11-19
 Fecha de inicio del ensayo : 2018-11-22
 Fecha de término del ensayo : 2018-12-01
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental
 Identificado con : HS 18012801 (EXMA-17260-2018)
 Validez del documento : Este documento es válido solo para el lote inspeccionado

PROYECTO: MONITOREO DE SEDIMENTOS DE LA TESIS DOCTORAL: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS Y PROPUESTA DE ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA - SEDIMENTOS) PARA LOS AFLUENTES DE LA CUENCA DEL RÍO RAMIS - PUNO"

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
RChac3	19L298318	8329213	Río Chacapalca antes de la unión con el río Ocuvi	Altitud: 4200 m.s.n.m.
ROcuv1	19L298064	8329360	Río Ocuvi antes de la unión con el río Chacapalca	Altitud: 4154 m.s.n.m.
RChac2	19L299889	8312555	Río Chacapalca a 1 km de la confluencia de los ríos Azufrini y Pataqueña	Altitud: 4474 m.s.n.m.
RAzuf1	19L300580	8311666	Río Azufrini 80 mt antes de la unión con el río Pataqueña	Altitud: 4453 m.s.n.m.
RPata2	19L300832	8311040	Río Pataqueña, después del vertimiento de efluente doméstico del campamento Arasi	Altitud: 4459 m.s.n.m.
RChac4	19L298333	8329537	Río Chacapalca 100mt después de la unión con el río Ocuvi	Altitud: 4164 m.s.n.m.
RChaq1	19L309529	8330674	Río Chaquelle 30mt antes de la descarga mina las Águilas	Altitud: 4341 m.s.n.m.
RChaq2	19L309446	8330578	Río Chaquelle 50 mt después de la descarga mina a las Águilas	Altitud: 4334 m.s.n.m.



CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 0000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (041) 344 040

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 2/10

RLIa1	19L294829	8344024	Río Llallimayo 100mt aguas arriba de la bocatoma Llallimayo	Altitud: 4172 m.s.n.m.
RMaca2	19L311087	8362943	Río Macarimayo ,aguas arriba del puente Macarimayo	Altitud: 3925 m.s.n.m.
RStro1	19L288378	8396748	Río santa Rosa, aguas arriba de la planta quesera	Altitud: 4534 m.s.n.m.
RAyav1	19L328236	8352991	Río Ayaviri , a 50 m aguas arriba del nuevo puente Ayaviri	Altitud: 3910 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos aguas arriba
RPuca1	19L354128	8336799	Río Pucara, a 50 m aguas arriba del puente Pucara	Altitud: 3871 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos aguas arriba
RPuca2	19L368386	8308290	Río Pucara , a 100 m aguas abajo del puente Calapuja	Altitud: 3864 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos aguas arriba
RRam1	19L384902	8304768	Río Ramis, a 100 m aguas arriba del puente Caminaca	Altitud: 3841 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos
RRam2	19L406156	8313266	Río Ramis , a 50 mt aguas abajo del puente Ramis	Altitud: 3826 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos
LRinc1	19L445052	8378612	Salida de la laguna Rinconada	Altitud: 4646 m.s.n.m. Coloración plomo oscuro(sedimento)
QLuor1	19L449742	8382621	Quebrada Lunar de oro	Altitud: 4659 m.s.n.m. Coloración plomo oscuro
RGran2	19L432023	8382014	Río Grande ,a 50m aguas arriba del puente Chuquine	Altitud: 4481 m.s.n.m.
RCruc2	19L388910	8411341	Río Crucero a, 100m aguas arriba del puente colgante Crucero	Altitud: 4134m.s.n.m.
RAnta3	19L364624	8414696	Río Antaula, a 100m aguas arriba antes de la confluencia con el río Crucero	Altitud: 4083 m.s.n.m. Presencia de residuos sólidos
RCruc3	19L383671	8413795	Río Crucero, a100 m aguas arriba de la bocatoma el Carmen	Altitud: 4083 m.s.n.m.
RAzan2	19L372663	8348189	Río Azangaro , a 250 m aguas abajo del vertimiento poblacional de Azangaro	Altitud: 3870 m.s.n.m.
RLari1	19L356849	8387723	Río Larimayo, a 50 m aguas arriba del puente Palmeras unión con Río Crucero.	Altitud: 3969 m.s.n.m.
RGran1	19L381510	8366370	Río Grande, a 100 m aguas arriba unión con el río Crucero.	Altitud: 3894 m.s.n.m.
RCruc5	19L381101	8387654	Río Crucero, a 200 m aguas arriba de la confluencia con el Río Grande.	Altitud: 3879 m.s.n.m.



CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 3/10

RESULTADOS

Estación de Muestreo	RChac3	ROcuv1	RChac2	RAzul1
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-16 09:05	2018-11-16 09:30	2018-11-16 11:40	2018-11-16 11:50
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	3 283	2 971	9 086	11 026
Antimonio (Sb)	0.04	mg/kg	0.3	1.26	0.5	1.19
Arsénico (As)	0.02	mg/kg	68.1	36.1	35.7	99.1
Bario (Ba)	0.04	mg/kg	72.5	127	73.7	80.8
Berilio (Be)	0.01	mg/kg	0.2	0.4	1.12	0.59
Cadmio (Cd)	0.02	mg/kg	0.5	0.9	0.1	0.2
Calcio (Ca)	10	mg/kg	2 257	6 502	3 265	267
Cobalto (Co)	0.02	mg/kg	8.8	5.12	7.4	3.7
Cobre (Cu)	0.02	mg/kg	64.4	16.4	228	386
Cromo (Cr)	0.2	mg/kg	9.73	8.2	9.6	137.6
Hierro (Fe)	0.05	mg/kg	133 613	121 037	243 934	2 340 098
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 066	2 115	1 643	332
Manganeso (Mn)	0.03	mg/kg	431	387	671	68.7
Mercurio (Hg)	0.03	mg/kg	<0.03	0.9	<0.03	0.1
Níquel (Ni)	0.01	mg/kg	8.99	7.83	8.59	8.4
Plata (Ag)	0.02	mg/kg	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Plomo (Pb)	0.02	mg/kg	33.4	90.4	14.5	17.8
Selenio (Se)	0.03	mg/kg	1.22	0.9	1.69	8.04
Talio (Tl)	0.02	mg/kg	0.5	0.2	0.4	0.6
Vanadio (V)	0.02	mg/kg	20.9	30.3	15.7	99.5
Zinc (Zn)	0.02	mg/kg	43.2	222	37.7	20.0



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 4/10

RESULTADOS (Continuación)

Estación de Muestreo	RPata2	RChac4	RChaq1	RChaq2		
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-16 12:05	2018-11-16 14:00	2018-11-16 14:45	2018-11-16 14:55		
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río		
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	1 506	3 587	3 514	3 471
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,9	0,4	0,2	0,3
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	28,2	64,7	4,17	5,89
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	37,3	94,8	44,5	107
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,7	0,2	0,5	5,28
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,2	0,7	0,1	13,3
Calcio (Ca)	10	mg/kg	3 889	2 424	2 110	3 524
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	4,48	9,86	7,44	20,1
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	6,01	115	7,53	22,4
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	4,08	7,15	5,78	9,08
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	69 166	113 223	176 800	272 014
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 404	966	2 257	2 447
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	416	596	253	473
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	<0,03	0,04	<0,03	<0,03
Níquel (Ni)	0,01	mg/kg	4,16	9,06	9,33	16,8
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	63,4	17,2	5,98	64,7
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	1,1	1,14	0,5	1,7
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,2	0,3	0,1	0,2
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	12	16,1	12,3	15,7
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	57	64,3	43	392



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 5/10

RESULTADOS (Continuación)

Estación de Muestreo	RLlal1	RMaca2	RStro1	RAYav1		
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-16 15:40	2018-11-16 16:55	2018-11-16 18:00	2018-11-17 05:32		
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río		
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	3 004	2 262	3 462	3 194
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,2	0,1	2,02	0,7
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	28,5	1,55	24,5	20
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	61,5	32,8	35,5	77,1
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,6	0,1	1,11	0,5
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,5	0,02	0,04	0,2
Calcio (Ca)	10	mg/kg	2 526	3 776	1 098	4 557
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	9,35	2,45	13,8	7,46
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	50,7	5,67	25	16,3
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	3,99	1,7	8,74	7,19
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	87 667	48 758	428 648	156 784
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 784	1 939	3 237	2 110
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	389	113	599	483
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,1	<0,03	0,04	0,1
Níquel (Ni)	0,01	mg/kg	6,97	1,4	26,1	10
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Piomo (Pb)	0,02	mg/kg	17,6	2,74	23,7	18,2
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,9	0,4	0,6	0,8
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,2	<0,02	0,04	0,1
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	13,5	10,8	9,25	16,3
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	50,9	18,9	110	59,6



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 6/10

RESULTADOS (Continuación)

Estación de Muestreo	RPuca1	RPuca2	RRami1	RRami2		
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-17 06:10	2018-11-17 07:20	2018-11-17 08:00	2018-11-17 08:35		
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río		
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	886	1 360	2 665	2 006
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,4	0,5	1,02	0,9
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	23,1	21,9	19	21,7
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	21,5	34,1	58,3	56
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,1	0,3	0,4	0,5
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,3	0,1	0,1	0,1
Calcio (Ca)	10	mg/kg	1 401	3 342	4 399	2 893
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	3,45	4,39	5,04	5,02
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	4,72	6,1	8,35	5,28
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	1,92	6,93	5,55	4,16
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	67 857	94 692	105 627	87 357
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	719	1 045	1 977	1 485
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	822	260	272	292
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Níquel (Ni)	0,01	mg/kg	4,72	5,95	7,63	6,58
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	4,96	8,81	11,7	11,7
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,4	0,7	0,6	0,6
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,04	0,05	0,1	0,1
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	5,07	13,6	9,79	7,57
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	19,9	28,7	47,1	40,8



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 7/10

RESULTADOS (Continuación)

Estación de Muestreo	LRinc1	QLuor1	RGran2	RCruc2		
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-17 11:40	2018-11-17 12:45	2018-11-17 14:35	2018-11-17 16:45		
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río		
Parámetro	Limite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 016	1 479	7 338	10 497
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	1,81	5,57	1,52	3,34
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	57,7	1 079	21	84,6
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	4,08	1,58	59,5	89,4
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,5	0,2	1,01	1,04
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,1	0,2	0,1	3,48
Calcio (Ca)	10	mg/kg	107	663	788	1 973
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	4,89	8,18	17,5	21,3
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	11	13,3	20,6	30,5
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	6,91	3,26	13,4	16,7
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	148 239	164 075	279 383	358 480
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 478	749	3 016	3 631
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	89,3	45,6	798	506
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,1	3,88	0,1	0,2
Niquel (Ni)	0,01	mg/kg	11,6	11,7	22	36,1
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	9,6	29,9	16,8	33,5
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,3	0,4	0,5	1,28
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,03	0,04	0,1	0,3
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	5,47	1,54	12,8	16,7
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	53,3	33,8	60,6	1 242



EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 8/10

RESULTADOS (Continuación)

Estación de Muestreo	RAnta3	RCruc3	RAzan2	RLari1		
Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-17 17:35	2018-11-17 17:45	2018-11-17 19:15	2018-11-18 07:48		
Tipo de Muestra	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río	Sedimento de Río		
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa						
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 916	3 895	2 132	1 106
Antimonio (Sb)	0.04	mg/kg	4,08	2,52	1,38	2,4
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	39	24,2	8,44	3,83
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	90,4	61,1	27,9	57,4
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,6	0,9	0,7	0,1
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,6	0,7	0,1	0,03
Calcio (Ca)	10	mg/kg	1 058	4 563	1 570	5 610
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	6,83	6,6	3,02	2,2
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	41,7	14,7	3,96	2,8
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	7,73	7,6	4,49	3,08
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	217 587	137 862	77 590	68 209
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 895	1 911	1 664	1 750
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	395	301	122	92,5
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,1	<0,03	<0,03	10,5
Níquel (Ni)	0,01	mg/kg	14,5	11,5	5,56	3,52
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	27,4	33,5	9,76	4,93
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,7	0,5	0,5	0,4
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,1	0,2	0,1	0,04
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	8,14	7,31	4,43	3,57
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	156	190	41,5	11,3



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 9/10

RESULTADOS (Continuación)

		Estación de Muestreo	RGran1	RCruc5
		Fecha y Hora de Muestreo	2018-11-18 09:39	2018-11-18 11:01
		Tipo de Muestra	Sedimento	Sedimento
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados
Metales Totales ICP-Masa				
Aluminio (Al)	2	mg/kg	1 767	1 430
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	1,42	1,68
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	9,45	10,1
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	51,2	23
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,8	0,1
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,1	0,1
Calcio (Ca)	10	mg/kg	4 251	1 750
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	2,61	2,56
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	4,23	4,44
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	3,82	3,08
Hierro (Fe)	0,05	mg/kg	58 866	61 775
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 558	855
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	160	109
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,1	0,1
Níquel (Ni)	0,01	mg/kg	4,16	4,51
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	5,9	8,88
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,4	0,3
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,04	0,05
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	3,74	3,16
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	23,2	47,9



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE 003



INFORME DE ENSAYO N° 2-02111/18

Página 10/10

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1, 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 03 de diciembre de 2018

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

Lit. Edue Mendoza Mamani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CHIMBOTE
Av. José Carlos Mariátegui s/n
Centro Cívico, Nuevo Chimbote
T. (049) 311 048

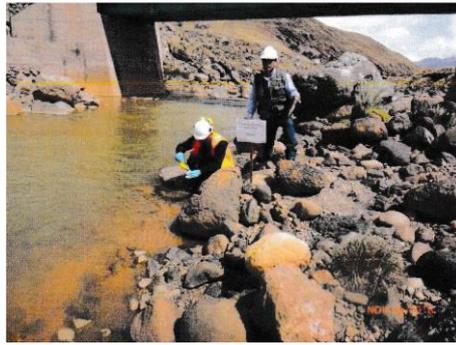
PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 63161

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



Anexo 3 Memoria fotográfica

Memoria fotográfica de los puntos de muestreo



RChac3



ROcuv1



Rchac2



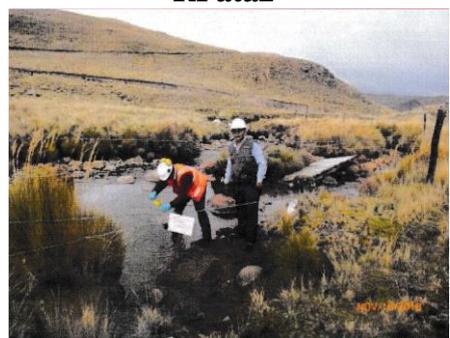
RAzuf1



RPata2



RChac4



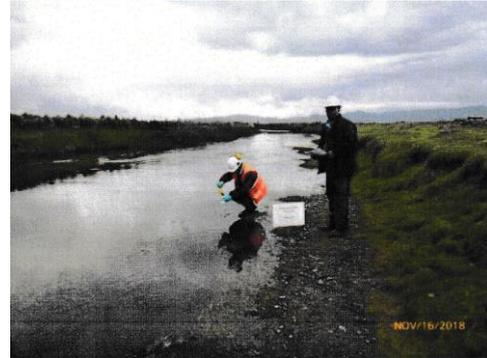
RChaq1



RChaq2



RLlal1



RMaca2



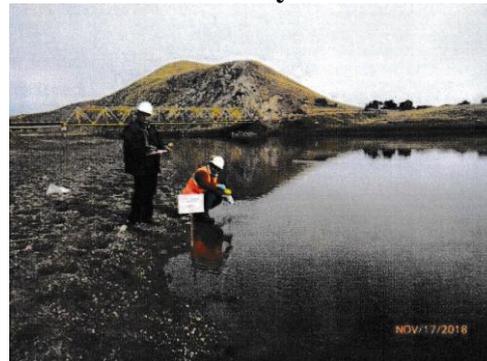
RStro1



RAYav1



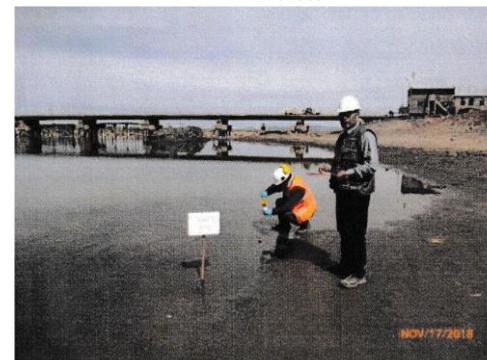
RPuca1



RPuca2



RRami1



RRami2



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ALBERTO CHOQUECOTA RIVA,
identificado con DNI 01856808 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente,
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS EN SEDIMENTOS EN LOS AFLUENTES DE LA CUENCA
DEL RÍO RAMIS - PUNO "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como mías las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 22 de Noviembre del 2023



FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo ALBERTO CHOQUECOTA RIVA
identificado con DNI 01856808 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
VARIACION ESPACIAL DE LA CONCENTRACION DE
METALES PESADOS EN SEDIMENTOS EN LOS AFLUENTES
DE LA CUENCA DEL RIO RAMIS - PUNO

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 22 de Noviembre del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella