

**Evaluación Ecotoxicológica mediante bioensayo  
con *Daphnia Pulex* en sedimentos del Río Suches,  
Cojata frontera Perú – Bolivia, 2019**

**Ecotoxicological Evaluation by means of bioassay  
with *Daphnia Pulex* in sediments of the Suches River,  
Cojata Peru-Bolivia Border, 2019**

Bethy Andy Mamani Villalba<sup>1</sup>

Bethy.mv@upeu.edu.pe

**Universidad Peruana Unión, Juliaca-Perú**

Ivan Edward Biamont Rojas<sup>2</sup>

biamont.ivan@gmail.com

**Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,  
Sorocaba-Brasil**

Brígida Calsin Quinto<sup>3</sup>

brigidacq@gmail.com

**Bahçeşehir Üniversitesi, Estambul-Turquía**

.....

**Resumen**

**L**as actividades antropogénicas extractivas no reguladas vierten sus desechos a cuerpos de agua sin cumplir estándares mínimos y estos compuestos metálicos presentan un potencial toxicológico cuando sedimentan. El objetivo fue evaluar la ecotoxicidad de metales pesados en sedimentos del río suches mediante bioensayo con *Daphnia pulex*. La metodología aplicada fue desarrollada en tres fases; exploración del área de estudio, ensayos laboratoriales de metales pesados y bioensayo toxicológico con *Daphnia pulex*. para la extracción del elutriado se trabajó con el Protocolo de prueba de toxicidad de sedimentos (Garmendía, et.al., 2009) y para el bioensayo con *Daphnia pulex* se aplicó la metodología establecida en la Norma Técnica Chilena (NCh2083.Of1999). Fueron evaluadas la concentración de metales pesados en sedimentos del río Suches (4 puntos de muestreo) y la toxicidad de los metales pesados

1 Ingeniero Ambiental, ORCID 0000-0002-9992-5649

2 Magister Scientiae, ORCID 0000-0002-6799-835X

3 Licenciado en Lingüística e Inglés, ORCID 0000-0003-2217-5736

presentes en sedimentos sobre la especie *Daphnia pulex*. La concentración donde no hay efectos observados (NOEC) para la MuSe-1 es 21.2 % (53 g/L), MuSe-3 es 32.2 % (80.5 g/L), MuSe-4 es 44.4 % (111.0 g/L), MuSe-5 es 57.3% (143.3 g/L) y la concentración del efecto más bajo observado (LOEC) para la MuSe-1 es 30.4 % (76 g/L), MuSe-3 es 41.0% (102.5), Muse-4 es 52.0 % (130.0 g/L), MuSe-5 es 67.6 % (169 g/L); la dosis que genera muerte al 50% de la población expuesta (CL 50) para la MuSe-1 es 37.5 % (93.6 g/L), MuSe-3 es 45.9 % (114.8 g/L), Muse-4 es 55.9 % (139.9 g/L), MuSe-5 es 63.8 % (159.4 g/L). Por lo tanto, se concluye que los sedimentos de la cuenca del río Suches presentan niveles tóxicos.

**Palabras Clave:**

*Daphnia pulex*, ecotoxicología acuática, metales pesados, minería, sedimentos, río Suches.

**Abstract**

Unregulated anthropogenic extractive activities discharge their wastes into water bodies without complying with minimum standards and these metallic compounds present a toxicological potential when they sediment. The objective was to evaluate the ecotoxicity of heavy metals in sediments of the Suches river by means of a bioassay with *Daphnia pulex*. This was developed in three phases: exploration of the study area, laboratory tests for heavy metals and toxicological bioassay with *Daphnia pulex*. for the extraction of the elutreate, the sediment toxicity test protocol was used (Garmendia, et.al., 2009) and for the bioassay with *Daphnia pulex*, the methodology established in the Chilean Technical Standard (NCh2083. Of1999) was applied. The concentration of heavy metals in sediments of the Suches river (4 sampling points) and the toxicity of heavy metals present in sediments on the species *Daphnia pulex* were evaluated. The concentration where there is no observed effect (NOEC) for MuSe-1 is 21.2 % (53 g/L), MuSe-3 is 32.2 % (80.5 g/L), MuSe-4 is 44.4 % (111.0 g/L), MuSe-5 is 57.3% (143.3 g/L) and the lowest observed effect concentration (LOEC) for MuSe-1 is 30.4 % (76 g/L), MuSe-3 is 41. 0% (102.5), Muse-4 is 52.0 % (130.0 g/L), MuSe-5 is 67.6 % (169 g/L); the dose generating death at 50% of the exposed population (LC 50) for MuSe-1 is 37.5 % (93.6 g/L), MuSe-3 is 45.9 % (114.8 g/L), Muse-4 is 55.9 % (139.9 g/L), MuSe-5 is 63.8 % (159.4 g/L). Therefore, it is concluded that the sediments of the Suches river basin present toxic levels.

**Keywords:**

*Daphnia pulex*, aquatic ecotoxicology, heavy metals, mining, sediments, Suches river.



**Introducción**

La actividad minera informal, a través de la disposición de relaves mineros y aguas ácidas en el ecosistema ha generado la contaminación, degradación y fragmentación de hábitats, esta es la realidad de muchos países en desarrollo. La cuenca del río Suches (cuenca endorreica transfronteriza del Lago Titicaca) es y ha sido impactada negativamente por la minería aurífera desarrollada en el país boliviano y peruano (Dirección Regional de Energía y Minas, 2019), mismo que ha generado el deterioro de la calidad del agua y sedimentos del río Suches, modificando las características físicas, químicas y biológicas de los mismos, por la introducción de metales pesados en altas concentraciones, generando riesgos a las especies de flora y fauna, alterando y creando efectos negativos en el desarrollo de su ciclo de vida, esto debido a que los metales pesados en altas concentraciones generan intoxicación, disminución de la fertilidad, daño celular y tisular, muerte celular y disfunción de varios órganos y sistemas (Oliveira citado por Valverde, 2015).

Los metales pesados en las concentraciones optimas (mientras no excedan ciertos niveles de concentración) son bioelementos esenciales para el desarrollo de actividades bióticas saludables de la biocenosis (Gao et al., 2014; Ebrahimi & Taherianfard, 2011). Sin embargo, cuando se encuentran en altas concentraciones en el sedimento o el agua, estos elementos se convierten en una amenaza para el ecosistema acuático debido a sus características de ecotoxicidad, su persistencia y su tendencia a acumularse en la cadena alimenticia.

Los bioensayos de toxicidad tienen como objetivo comprender y predecir los efectos nocivos de sustancias tóxicas (químicas o físicas) presentes en el ambiente, sobre organismos vivos que son parte fundamental de los

ecosistemas (vegetales, microorganismos, animales y el hombre); es decir analizar y evaluar los riesgos ambientales, ecológicos y de salubridad que pueden generarse a causa de los contaminantes potencialmente tóxicas en un ambiente (Calvo, Oviedo, Yañez, & Zapata, 2012; Campo, 2002).

En el ecosistema acuático, los sedimentos son un indicador importante de la salud ecosistémica, ya que la composición y dinámica de los sedimentos determina y condiciona la distribución de las especies; esto debido a que los sedimentos son sumideros de metales al contener hasta más del 90% de los mismos en el medio (Zahra et al., 2014); es así que los sedimentos son una fuente secundaria de contaminación que podrían volver a liberar sus contaminantes en las columnas de agua (Wang et al., 2015). La biodisponibilidad y ecotoxicidad de los metales en los sedimentos dependen de las interacciones entre muchas variables, como el pH, la salinidad, el potencial redox, el contenido mineral y orgánico y la biota residente (Souza et al., 2015).

Las especies más utilizadas para los estudios ecotoxicológicos son las *Daphnias* (Ramirez & Mendoza, 2008), esto debido a su amplia distribución geográfica, la facilidad de cultivo en el laboratorio y la reproducción partenogenética que asegura la reproducción rápida de neonatos, y principalmente debido a que este organismo es un eslabón fundamental en la cadena alimenticia ya que es uno de los consumidores de primer orden dentro del ecosistema acuático (Navarro & Rodríguez, 2012).

Según lo expuesto anteriormente, se destaca la necesidad de determinar los efectos toxicológicos potenciales generados en el ecosistema acuático causados por los contaminantes procedentes de la actividad minera ilegal, mismos que se depositan en el fondo del río y se asocia con los sedimentos. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo general (OG): Evaluar la toxicidad de los sedimentos del río Suches mediante bioensayos con *Daphnia pulex*. los objetivos específicos (OE): OE.1 - Diagnosticar la situación ambiental actual de la contaminación en la cuenca del río Suches por la minería informal, OE.2 -Determinar la concentración de

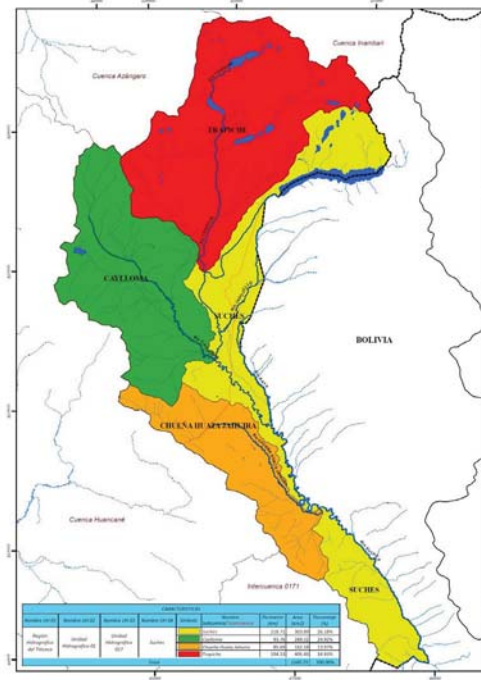
metales pesados y parámetros, fisicoquímicos en sedimentos del río Suches para contrastarlos con normativa internacional vigente OE.3 - Evaluar la toxicidad aguda de sedimentos del río Suches mediante bioensayos con *Daphnia pulex* por un período de 24 y 48 horas (CL50<sub>24h - 48h</sub>).

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

La cuenca hidrográfica del río Suches compartida entre Perú y Bolivia (cuenca transfronteriza), es tributaria de la vertiente del Lago Titicaca perteneciente al sistema endorreico Titicaca - Desaguadero - Poopó - Salar de Coipasa (Sistema TDPS). Esta se encuentra en la jurisdicción del distrito de Cojata y Centro Poblado Trapiche de la provincia de Huancané y San Antonio de Putina en el departamento de Puno. La cuenca está conformada por tres (03) subcuencas principales: río Trapiche (curso alto), río Caylloma (curso medio alto), río Chueña Huata Jahuirá (curso bajo) y la Intercuenca río Suches conformada por el río Japojollu y río La Raya; la superficie total de la cuenca del río Suches es de 2923.36 km<sup>2</sup>, de los cuales 1160.75 km<sup>2</sup> de área de la cuenca corresponde al Perú y 1762.61 km<sup>2</sup> a Bolivia; la longitud del cauce principal es de 118.96 km y tiene una pendiente media de 0.66%. (Autoridad Nacional del Agua, 2017).

**Figura 1.** Ubicación de los pozos tubulares y artesanales.



**Fuente:** ANA, 2014.

### Muestreo de sedimentos

La colecta de sedimentos fue el 24 de enero de 2019, durante la temporada de lluvia; antes de la recolección, se analizaron imágenes de satélite y mapas para elegir previamente los puntos de muestreo, asimismo se tomó en cuenta las líneas guía para identificación de puntos de muestro de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2017) (Tabla 1).

Se eligieron cinco (05) puntos de muestreo (MuSe-01, MuSe-02, MuSe-03, MuSe-04, MuSe-05), no se logró obtener la muestra de la MuSe-02 porque el lugar era inaccesible debido a las constantes precipitaciones pluviales. Las coordenadas geográficas se georreferenciaron en UTM-WGS84. Se

colectaron las muestras por triplicado utilizando un muestreador de acero inoxidable para luego ser homogenizados en un recipiente de polietileno y colocarlos en bolsas ziplock. Todos los contenedores utilizados para el muestreo fueron previamente limpiados, descontaminados y etiquetados para ser enviados a laboratorio.

**Tabla 1.** Puntos de muestreo de sedimentos en la cuenca del río Suches

N°	Código	Nombre del punto	Coordenadas		Zona
	Sedimento		X	Y	
1	MuSe-01	Laguna Suches	463521	8364382	19 L
2	*MuSe-02	Aguas abajo de la Intersección de la cuenca del río suches con el río Trapiche	--	--	--
3	MuSe-03	Aguas abajo de la Intersección de la cuenca del río suches con el río Japojollu	458766	8347243	19 L
4	MuSe-04	Aguas abajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Caylloma	459895	8343681	19 L
5	Muse-05	Intercuenca del río Suches Hito 8	463678	8339439	19 L

\*No se logró obtener la muestra de este punto porque el lugar era inaccesible debido a las constantes precipitaciones pluviales.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Extracción de Elutreado**

Las muestras de sedimentos fueron transportadas y almacenadas a 4 °C en el laboratorio continental de Puno del Instituto del Mar del Perú, hasta su utilización para la extracción de los elutreados.

Se produjeron extracciones estandarizadas de elutreados durante 24 horas para cada muestra de sedimentos (MuSe-01, MuSe-03, MuSe-04, MuSe-05), siguiendo los protocolos de Garmendia et al. (2009), para asegurar

la extracción fiable y representativa para su uso en bioensayos agudos. Se pesó 250 gr de sedimentos y se depositó en un envase de 1000 ml (estéril de PVC), posteriormente se añadió 1000 ml de agua del lago filtrada (agua sin contaminación); se procedió a mezclar y agitar durante 1 hora de manera manual y se preservó a 4° C. se centrifugo el compuesto a 3000 rpm durante 25 min; el agua sobrenadante fue filtrada con la ayuda de un embudo y se trasvaso a otro recipiente de 1000 ml (estéril de PVC); se preservaron las muestras nuevamente a 4° C hasta la prueba, sin exceder un tiempo de retención de una semana.

### **Evaluación de los metales pesados**

La evaluación de metales pesados en sedimentos fue realizada por los Laboratorios Analíticos del Sur en la ciudad de Arequipa, mismo que cuenta con la acreditación de INACAL para certificar los resultados de los ensayos respectivos, fueron analizados mediante las siguientes metodologías:

- 7002 EPA 200.7 Determinación de Arsénico en suelos y Sedimentos (lixiviación ácida) por ICV-OES.
- 7003 EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en suelos y Sedimentos (lixiviación ácida) por ICV-OES.
- 7022 EPA 200.7 Determinación de Mercurio en suelos y Sedimentos (lixiviación ácida) por ICV-OES.

La categorización de los metales y su comparación según su toxicidad fue realizada mediante la comparación con las guías canadienses para Sedimentos (CCME, 1999). Estas guías categorizan los sedimentos según dos estándares el ISQG/TEL (*Threshold Effect Level*) un valor limite hasta donde las concentraciones no causan problemas al medio acuático. También está el PEL (*Probable Effect Level*), este indica que por encima de este valor hay un efecto probable de la concentración de un metal al ambiente.



## **Diseño Experimental y Bioensayos con *Daphnia Pulex***

### ***Diseño Experimental***

En la figura 2 se puede observar el diseño experimental del estudio de exposición de elutreados a la especie *Daphnia Pulex* para cada combinación de elutreados, como se describe a continuación; las especies *Daphnia pulex* fueron cultivadas en el laboratorio del Instituto del Mar del Perú de la ciudad de Puno, los cultivos fueron conservados en agua filtrada del lago Titicaca (no contaminada) en un régimen de temperatura controlada (17-21 °C) a un fotoperíodo de 16 h de luz a 8 h de oscuridad. Para las pruebas de ecotoxicidad se seleccionaron neonatos de la 3<sup>a</sup> a la 5<sup>a</sup> generación.

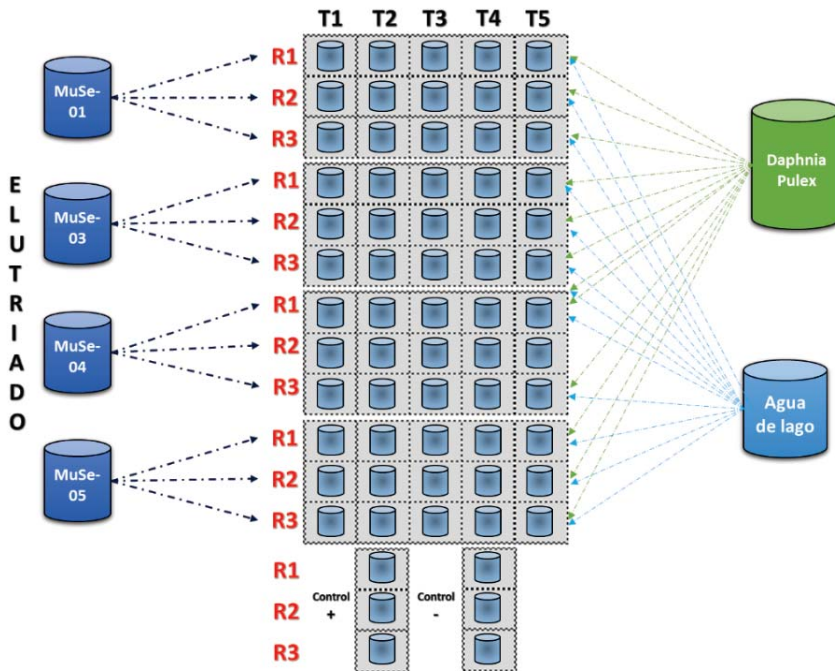
### ***Bioensayo de toxicidad aguda - prueba de Inmovilización de Daphnia Pulex***

Se realizó el Screening test donde se utilizaron elutreados de cuatro (04) tratamientos por cada muestra sin replicas, obteniendo un total de 16 diluciones al 100%, 50%, 10% y 1%. En un envase de PVC estéril. Se añadió 30 ml de cada una de las diluciones y 10 neonatos. El conteo fue realizado pasadas las 24 y 48 horas, a una temperatura de  $20 \pm 1$  °C con un fotoperíodo claro: oscuro de 16:8 h, siguiendo la Norma Técnica Chilena (NCh2083.Of, 1999) (Chile, 2019).

Finalmente se realizaron las pruebas definitivas estableciendo los rangos de los elutreados para los ensayos de toxicidad aguda; para la MuSe-01 se trabajó en un rango de porcentaje de 50% - 10%, la MuSe-03 de 60% - 30%, la MuSe-04 de 70% - 30% y la MuSe-05 de 80% - 40% de elutreado, así mismo; se utilizó un control negativo (-) y un control positivo (+) usando Dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) (Figura 2), (siguiendo el mismo procedimiento de la Norma Técnica Chilena). En un vaso de PVC estéril se añadieron las concentraciones descritas anteriormente y se expusieron 10 neonatos por dilución, todas las pruebas fueron realizadas por triplicado consecutivo y la inmovilización de las *Daphnia pulex* se observaron a 24 h y 48 h de exposición, donde se registró el número de organismos

inmovilizados; durante las pruebas de bioensayo no se proporcionó ningún alimento a las especies de prueba.

**Figura 2. Diagrama de preparación de tratamientos y diluciones.**



**Fuente:** Elaboración propia.

### Análisis Estadístico

De acuerdo a la metodología establecida en el protocolo de bioensayo con la especie *Daphnia pulex* se utilizó el diseño completamente al azar (DCA), en el que cada muestra tuvo cinco (05) diluciones o tratamientos, la variable de respuesta es la mortalidad del organismo de prueba (Y), el número de repeticiones por tratamiento fue tres (03), haciendo un total de quince (15) unidades experimentales por punto de muestreo, totalizando para los cuatro puntos con un total de sesenta (60) tratamientos, más los

controles positivos y negativos (también por triplicado), el modelo lineal aditivo fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

$Y_{ij}$  = “Variable de respuesta (mortalidad)”.

$\mu$  = “Promedio general”.

$\tau_i$  = “Efecto de la  $i$ -ésima concentración de la muestra”.

$\varepsilon_{ij}$  = “Efecto del error experimental”.

Los resultados se trabajaron con un nivel de confiabilidad del 95 por ciento; empleando el estadístico Probit.

## Resultados

### Exploración del Área de estudio

El río Suches nace de la Laguna Suches, misma que se forma por el derretimiento del Nevado Palomani, y forma el río Suches, esta atraviesa por las Comunidades de Trapiche, Comunidad Aurora, Comunidad Quenajani, Comunidad Mallcunuta, Comunidad Chajana, Comunidad Huattapata, Comunidad Tumapiura, Comunidad Umabamba, Comunidad Paria Occopampa, Comunidad Ñeqtuni, Comunidad Villapampa; las comunidades mencionadas se dedican a la ganadería, que consta de la crianza de ovinos y camélidos sudamericanos y vicuñas (Dirección Regional Agraria Puno, 2018). En la cabecera de cuenca (Laguna Suches) se desarrolla la actividad minera informal e ilegal por cooperativas mineras, las cuales no cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales y disposición adecuada de aguas ácidas y relaves, realizando la disposición de aguas ácidas y relaves a la Laguna Suches; en el recorrido del río Suches se encontraron las minas Perlas de Oro, Mina Suches y algunas cooperativas

mineras que se encuentran en el lado boliviano.

La población rural manifiesta que la actividad minera ha generado impactos negativos en su actividad económica y calidad de vida, debido a que las aguas de la cuenca del río Suches son destinadas para bebida de animales; así mismo, ha impactado también en el recurso edáfico a través de la remoción de suelos y pérdida de cobertura vegetal por la disposición directa de relaves, lo cual ha conllevado a la deforestación y erosión de los suelos. Se ha identificado también que la geografía ha sido modificada generando la destrucción del paisaje.

El impacto directo generado, es la contaminación de la cuenca del río Suches y la degradación del ecosistema acuático; las consecuencias indirectas afectan principalmente a la flora, fauna y la salud humana, debido a que uno de los residuos principales de la actividad minera es el mercurio, este metal pesado presenta características de persistencia en el medio ambiente ya que no es biodegradable y se bioacumula en forma de metilmercurio. La disposición directa de relaves y aguas ácidas en la cuenca del río Suches incrementa la turbidez del agua, este proceso obstaculiza el desarrollo del ciclo de la cadena trófica, ya que la turbidez impide el ingreso de rayos UV dificultando el adecuado proceso fotosintético, condicionando también la distribución y reproducción de flora y fauna acuática. Los sedimentos y relaves presentes en la cuenca precipitan en la superficie del cuerpo de agua, albergando metales pesados; es importante resaltar que en época de estiaje el caudal del río es casi laminar, sin embargo; en época de avenida el caudal es turbulento, generando de esta manera la remoción, dispersión y dilución de los contaminantes albergados en los sedimentos del cuerpo de agua.

### **Análisis de metales pesados**

Los resultados de la evaluación de metales pesados en sedimentos del río Suches se muestran en la Tabla 2, la unidad de medida en todos los casos es mg/Kg:

**Tabla 2.** Resultados de análisis de metales pesados en sedimentos de la cuenca del Río Suches

Nº	Cód. Muestra	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr
1	MuSe-01	a<0.24	>10000	2.93	14.95	155.24	0.47	3750.00	4.18	7.93	24.69
3	MuSe-03	a<0.24	>10000	1.50	9.62	147.13	0.56	509.00	6.52	9.35	32.94
4	MuSe-04	a<0.24	>10000	a<0.12	10.17	141.80	0.49	486.00	4.29	7.38	20.67
5	MuSe-05	a<0.24	>10000	a<0.12	15.17	184.53	0.64	746.00	4.65	8.53	23.81
Nº	Cód. Muestra	Cu	Fe	Hg	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni
1	MuSe-01	27.54	>10000	0.46	5580.00	19.88	3166.0	284.28	a<0.038	473.00	17.61
3	MuSe-03	27.67	>10000	0.28	5890.00	31.06	3335.0	264.58	a<0.038	494.00	24.27
4	MuSe-04	21.7	>10000	0.07	5910.00	25.30	2378.0	248.36	a<0.038	438.00	15.15
5	MuSe-05	38.24	>10000	a<0.041	7770.00	31.16	2743.0	310.56	a<0.038	648.00	17.08
Nº	Cód. Muestra	P	Pb	Sb	Se	Sn	Sr	Ti	Tl	V	Zn
1	MuSe-01	407.50	2.72	a<0.049	a<0.2	a<0.085	40.40	189.87	a<0.13	32.97	46.73
3	MuSe-03	361.80	9.78	a<0.049	a<0.2	0.4864	17.10	77.583	a<0.13	36.48	60.31
4	MuSe-04	322.40	a<0.26	0.4201	a<0.2	a<0.085	19.03	100.48	a<0.13	33.15	40.38
5	MuSe-05	366.60	a<0.26	a<0.049	a<0.2	0.1395	23.84	134.79	a<0.13	40.78	47.17

a<: valores menores.

**Fuente:** Elaboración propia.

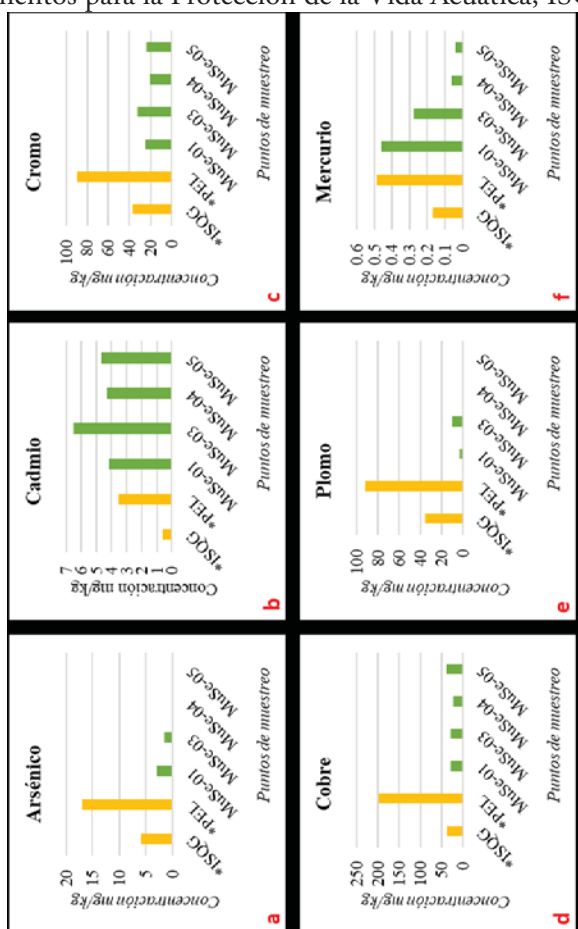
Los ensayos laboratoriales indican que la concentración más baja del K (potasio) es de 5580 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más alta es de 7770 mg/kg (MuSe-05); en referencia al Na (sodio) la concentración más baja es de 438 mg/kg (MuSe-04) y la concentración más alta es de 648 mg/kg (MuSe-05). Li (Litio), la concentración más baja es de 19.88 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más alta es de 31.16 mg/kg (MuSe-05), Ca (Calcio) la concentración más baja es de 486 mg/kg (MuSe-04) y la concentración más alta es de 3750 mg/kg (MuSe-01); en referencia al Mg (magnesio) la concentración más baja es de 2378 mg/kg (MuSe-04) y la concentración más alta es de 3335 mg/kg (MuSe-03); en referencia al Ba (Bario), la concentración más baja es de 141.80 mg/kg (MuSe-04) y la concentración más alta es de 184.53 mg/kg (MuSe-05); en referencia al Sr (Estroncio), la concentración más baja es de 17.10 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más alta es de 40.40 mg/kg (MuSe-01); en referencia al Be (Berilio), la concentración más baja es de 0.47 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más alta es

de 0.64 mg/kg (MuSe-05), la concentración más alta del Ti (titanio) es de 189.9 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más baja es de 77.6 mg/kg (MuSe-03), la concentración más baja del V (Vanadio) es de 32.97 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más alta es de 40.78 mg/kg (MuSe-05), la concentración más alta de Cr (Cromo) es de 32.94 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más baja es de 20.67 mg/kg (MuSe-04), en referencia al Mo (Molibdeno) las concentraciones en todas las muestras son menores a <0.038 mg/kg en todas las muestras; la concentración más alta de Mn (Manganeso) es de 310.56 mg/kg (MuSe-05) y la concentración más baja es de 248.36 mg/kg (MuSe-04), la concentración de Fe (Hierro) son mayores a >10000 mg/kg en todas las muestras; la concentración más alta de Co (Cobalto) es de 9.35 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más baja es de 7.38 mg/kg (MuSe-04); en referencia al Ni (Níquel) la concentración más alta es de 24.27 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más baja es de 15.15 mg/kg (MuSe-04), la concentración más alta de Cu (Cobre) es de 38.24 mg/kg (MuSe-05) y la concentración más baja es de 27.70 mg/kg (MuSe-04); en referencia a la Ag (Plata) las concentraciones son menores a 0.24 mg/kg en todas las muestras, la concentración del Al (Aluminio) se encuentra <1000 mg/kg en todas las muestras; en referencia al B (Boro) la concentración más alta es 15.17 mg/kg (MuSe-05) y la concentración más baja es de 9.62 mg/kg (MuSe-03), la concentración de Tl (Talio) es <0.13 en todas las muestras; la concentración más alta de Pb (Plomo) es de 9.78 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más baja es de 0.26 mg/kg (MuSe-04 y MuSe-05); en referencia al Sn (Estaño) la concentración más alta es de 0.49 mg/kg (MuSe-03) y la concentración más baja es de 0.09 mg/kg (MuSe-01 y MuSe-04), la concentración más alta de P (Fosforo) es de 404.50 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más baja es de 322.40 mg/kg (MuSe-04); en referencia al As (Arsénico) la concentración más alta es de 2.93 mg/kg (MuSe-01) y la concentración más baja es de 0.12 mg/kg (MuSe-04 y MuSe-05) y en referencia al Sb (Antimonio) la concentración más alta es de 0.42 mg/kg (MuSe-04) y la concentración más baja es <0.049 mg/kg (MuSe-01, MuSe-03 y MuSe-05), y finalmente la concentración de Se (Selenio) es <0.2 mg/kg en todas las muestras.

### Comparación de resultados con normativa internacional

A continuación, se detalla la comparación de resultados con los Lineamientos de la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática, ISQG y PEL comparadas con los resultados de los puntos de muestreo y parámetros y evaluados:

**Figura 3.** Comparación de resultados con los Lineamientos de la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática, ISQG y PEL.



\*Fuente: CCME, 1999.

En la figura 3.a y 3.c se observa que el Arsénico y el Cromo no exceden los valores del ISQG y PEL (CCME, 1999); es decir, estos representan riesgos para la salud humana y efectos sobre la vida acuática; sin embargo, en la figura 3.a. se observa que el Cadmio si excede en todos los puntos muestreados al ISQG y PEL, representando riesgos a la salud humana y efectos al ecosistema acuático.

En la figura 3.d, se observa que la concentración de Cobre en el punto de muestreo de la Intercuenca del río Suches Hito 8 (MuSe-05) excede los límites del ISQG, pero no excede los límites del PEL; sin embargo, en el resto de las muestras las concentraciones de cobre no exceden los límites del ISQG y PEL.

En la figura 3.e, se observa que las concentraciones de Plomo en las muestras (MuSe-01), (MuSe-03), (MuSe-04) y (MuSe-05) no exceden los límites del ISQG y PEL; es decir, estos no representan riesgos para la salud humana y efectos sobre la vida acuática. En la figura 3.f, se observa que las concentraciones de Mercurio en los puntos de muestreo de la Laguna Suches (MuSe-01) y Aguas debajo de la Intersección de la cuenca del rio Suches con el río Japojollu (MuSe-03) exceden los límites del ISQG; sin embargo, estos no exceden los límites del PEL. En referencia al resto de las muestras (MuSe-04) y (MuSe-05), estas no exceden los límites del ISQG y PEL. En la figura 3.g, se observa que las concentraciones de Zinc en las muestras (MuSe-01), (MuSe-03), (MuSe-04) y (MuSe-05) no exceden los límites del ISQG y PEL; es decir, estos no representan riesgos para la salud humana y efectos sobre la vida acuática.

### **Bioensayo de toxicidad aguda**

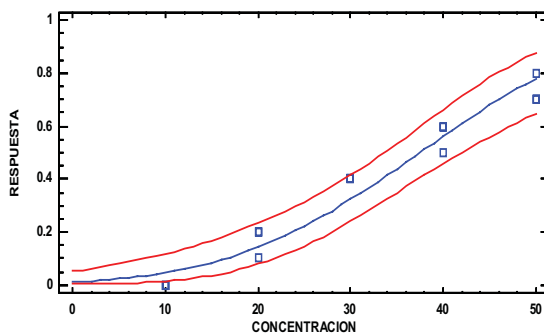
Los resultados de los ensayos de toxicidad aguda se muestran en las siguientes tablas:



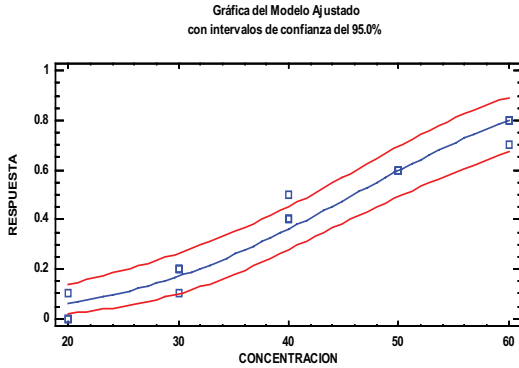
**Tabla 3.** Respuesta de inmovilización de *Daphnia pulex* expuestas a los puntos de muestreo en 24 y 48 horas

MuSe-01									
Concentración		24 horas			Promedio	48 horas			Promedio
g/L	%	R1	R2	R3		R1	R2	R3	
25	10	0	0	0	0	0	0	0	0
50	20	1	1	0	1	2	1	2	1.7
75	30	2	1	1	1	4	4	4	4.0
100	40	3	3	3	3	5	6	6	5.7
125	50	5	5	4	5	7	8	7	7.3
<b>CL 50</b>		<b>50.6309</b>				<b>37.4598</b>			

Gráfica del Modelo Ajustado con intervalos de confianza del 95.0%

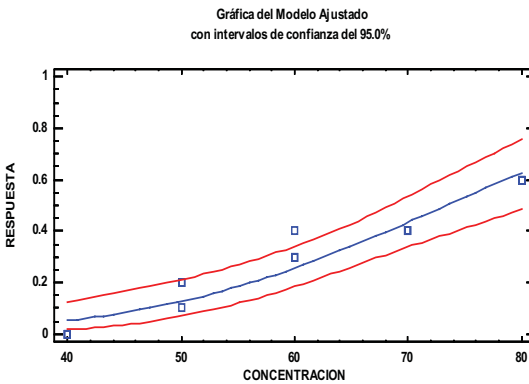


MuSe-03									
Concentración		24 horas			Promedio	48 horas			Promedio
g/L	%	R1	R2	R3		R1	R2	R3	
50	20	0	0	0	0	0	1	0	0.3
75	30	1	1	1	1	2	2	1	1.7
100	40	2	2	2	2	4	5	4	4.3
125	50	4	3	3	3	6	6	6	6
150	60	5	4	4	4	8	8	7	7.7
<b>CL 50</b>		<b>61.1658</b>				<b>45.9106</b>			



**MuSe-04**

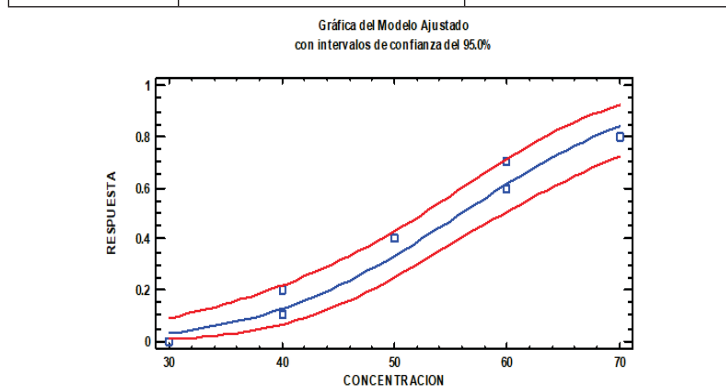
Concentración		24 horas			Promedio	48 horas			Promedio
g/L	%	R1	R2	R3		R1	R2	R3	
75	30	0	0	0	0	0	0	0	
100	40	1	1	1	1	1	2	1	
125	50	1	0	0	0	4	4	4	
150	60	4	4	4	4	7	6	6	
175	70	6	5	5	5	8	8	8	
<b>CL 50</b>		<b>66.1889</b>			<b>55.9478</b>				



**MuSe-05**

Concentración		24 horas			Promedio	48 horas			Promedio
g/L	%	R1	R2	R3		R1	R2	R3	
75	30	0	0	0	0	1	0	0	
100	40	2	2	1	2	3	2	2	
125	50	4	3	3	3	6	5	5	

150	60	4	4	4	4	7	7	5	
175	70	6	6	6	6	8	8	7	7.7
<b>CL 50</b>		<b>73.3866</b>				<b>63.7653</b>			



Fuente: Elaboración propia.

La dosis letal que genera la muerte al 50 % ( $DL50_{48h}$ ) de la población expuesta a la MuSe-01 es de 37.46% en 48 horas, para la MuSe-03 es de 45.91% en 48 horas, para la MuSe-04 es de 55.95% y finalmente para la MuSe-05 es de 63.76%.

### Cálculo de unidades tóxicas en 24 y 48 horas de evolución

Se aplicó la ecuación descrita a continuación:

**Tabla 4.** Cálculo de Unidades tóxicas en 24 y 48 horas de evolución.

Nº	Código de muestra	UT	
		24 horas	48 horas
1	MuSe-01	2.0	2.7
2	MuSe-02	--	--
3	MuSe-03	1.6	2.2
4	MuSe-04	1.5	1.8
5	MuSe-05	1.4	1.6

Fuente: Elaboración propia.

A partir del cálculo de las unidades toxicológicas se determina el nivel de toxicidad:

**Tabla 5.** Niveles de toxicidad de los sedimentos del río Suches.

N°	Código de muestra	Nivel de toxicidad	
		24 horas	48 horas
1	MuSe-01	Moderadamente Tóxico	Tóxico
2	MuSe-02	--	--
3	MuSe-03	Moderadamente Tóxico	Tóxico
4	MuSe-04	Moderadamente Tóxico	Moderadamente Tóxico
5	MuSe-05	Moderadamente Tóxico	Moderadamente Tóxico

**Fuente:** Elaboración propia.

### Discusión

En el estudio realizado por Apaza (2016) en la cuenca del río Suches determinó que el contenido de mercurio en agua es de 0.00020 mg/L y en sedimentos es de 0.2 mg-Hg/Kg. Concluyendo que estos rangos al no exceder los valores establecidos en la normativa ambiental vigente, las concentraciones de mercurio en agua y sedimentos no representarían un problema ni riesgo para el ecosistema acuático ni la salud de la población. Sin embargo, en el desarrollo del presente estudio se determinó que en 2 de las muestras MuSe-01 y MuSe-03 se encontraron 0.46343 mg-Hg/Kg y 0.27516 mg-Hg/Kg respectivamente, estos valores exceden la normativa ambiental canadiense ISQG (índices de calidad de los sedimentos) 0.17 mg-Hg/Kg, mismos que indicarían la contaminación de los sedimentos en la cabecera de cuenca (laguna Suches).

En referencia a estudios de evaluación de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Suches, no se cuenta con antecedentes; sin embargo, existen estudios en países latinoamericanos como en la cuenca del río Puyango, Ecuador, donde determinaron que la concentración de los elementos estudiados en los sedimentos va en el orden Fe > Al > Mn

> Zn > Cu > Pb > Co > Ni > Hg; este estudio desarrollado por Mora (2016), establece que la presencia de estos metales pesados se deba a la descarga de lixiviados mineros. En el presente estudio se determinó que el contaminante que prevalece con altos valores en todas las muestras y exceden los valores establecidos por la normativa internacional van en el siguiente orden Cd > Hg > Cu.

La composición de la cuenca hidrográfica tiene un rol fundamental para conocer la acumulación de metales en forma natural en el lecho de los ríos (Xia, et al., 2021) estos aspectos influyen en la calidad del agua y de los sedimentos en estos cuerpos. En el proceso de extracción de Oro, como en las minas ubicadas en la cuenca alta, se usa el Cadmio y al tener un proceso artesanal este compuesto es desechado sin ningún tipo de restricción o fiscalización. Mercurio es otro metal de importancia porque al igual que el Cadmio es utilizado para formar amalgamas y así extraer el oro. Sin un debido proceso de amalgamación y extracción este metal termina en el sedimento junto al material particulado producto del procesamiento de este metal.

En el Perú no existen estudios relacionados a la toxicidad generada por la contaminación minera en un ecosistema acuático, por ello no se tiene antecedentes para poder contrastarlos con el presente estudio; sin embargo, existe una investigación realizada en Sudáfrica (Hill & Jooste, 1999), donde se evaluó el impacto potencial de los sedimentos contaminados del Blesbok Spruit cerca de Witbank que recibe el drenaje ácido de la mina; donde aplicaron las pruebas de toxicidad aguda en *Daphnia pulex* utilizando tanto agua intersticial de sedimentos extraídos como agua superficial, donde determinaron que la CL 50 promedio del elutriado de sedimentos es de 5.43 g/L; sin embargo en el presente estudio desarrollado en la cuenca del río Suches la CL 50 en la MuSe-01 es de 37.5 g/L, en la MuSe-03 es de 45.9 g/L, en la MuSe-03 es de 55.9 g/L y en la MuSe-04 es de 63.8 g/L, esto mostraría que los niveles de contaminación en Witbank son muchos más elevados a los de la cuenca del río Suches; sin embargo, esto es un indicativo que los niveles ecotoxicológicos de un ecosistema están relacionados a diferentes factores, empezando por el

tiempo de contaminación de la actividad minera, los factores climáticos, las características geológicas y edafológicas, la disponibilidad de biota en el ecosistema acuático, entre otros.

### **Conclusiones**

Se determinó la toxicidad de los sedimentos en el río Suches ya que su rango promedio es de 2.1 Unidades Toxicológicas, esto conllevaría a la degradación progresiva del hábitat de los organismos bentónicos; asimismo, condiciona la calidad del agua de la cuenca generando riesgos a la salud del ecosistema. Se determinó que a lo largo de la cuenca del río Suches la zona más impactada por la actividad minera informal e ilegal está en la cabecera. en la laguna Suches. Tanto del lado peruano como boliviano, que las minas drenan sus aguas residuales, aguas ácidas y relaves mineros a la misma laguna sin previo tratamiento, que a su vez forma el río Suches.

Cadmio, Mercurio son los metales que se encuentran por encima del PEL. Entre 4.18 a 6.52 mg-Cd/kg y 0.07 a 0.46 mg-Hg/kg. Determinamos que Cadmio es el principal metal pesado que genera la degradación del ecosistema acuático y la pérdida de la biota en la cuenca del río Suches según los estándares canadienses.

Los bioensayos toxicológicos determinan que la Dosis Letal media en 48 horas de exposición (CL 50 – 48h) que genera la mortandad o inmovilización de los individuos de prueba expuestos a la muestra obtenida de la Laguna Suches (MuSe-01) es 37.5 % (93.6 g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Japojollu (MuSe-03) es 45.9 % (114.8 g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Caylloma (MuSe-04) es 55.9 % (139.9 g/L) y en la Intercuenca del río Suches Hito 8 (MuSe-05) es 63.8 % (159.4 g/L).

Se determinó también que la concentración sin efecto observado (NOEC) en la Laguna Suches (MuSe-1) es 21.2 % (53 g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Japojollu (MuSe-3)

es 32.2 % (80.5 g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Caylloma (MuSe-4) es 44.4 % (111.0 g/L) y en la Intercuenca del río Suches Hito 8 (MuSe-5) es 57.3% (143.3 g/L); es decir, estos niveles de concentración no generarían mortalidad ni efecto agudo en los organismos de prueba (*Daphnia pulex*).

La concentración más baja del efecto observado (LOEC) para la Laguna Suches (MuSe-1) es 30.4 % (76 g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Japojollu (MuSe-03) es 41.0% (102.5g/L), en las aguas debajo de la Intersección de la cuenca del río Suches con el río Caylloma (MuSe-4) es 52.0 % (30.0 g/L) y en la Intercuenca del río Suches Hito 8 (MuSe-5) es 67.6 % es (169 g/L); es decir, estos serían los niveles de concentración mínimos que generarían la mortandad y efecto agudo en los organismos de prueba (*Daphnia pulex*).

### **Agradecimientos**

Al Instituto del Mar del Perú de la sede Puno (IMARPE) por financiar parte de la investigación del presente trabajo de investigación.

### **Referencias**

- Apaza, H. (2016). *Determinación del contenido de mercurio en agua y sedimentos del río Suches-zona bajo Paria Cojata - puno* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from [http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2854/Apaza\\_Porto\\_Hernan.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2854/Apaza_Porto_Hernan.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Autoridad nacional del agua. (2017). Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua (p. 364). p. 364. Retrieved from [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/guia\\_de\\_la\\_zona\\_demezcla\\_1\\_0.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/guia_de_la_zona_demezcla_1_0.pdf)
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales* (p. 92). p. 92. Retrieved

- from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0>
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). *Evaluación de la calidad del agua superficial de la cuenca del lago titicaca – sector peruano 2011-2014*. Retrieved from [http://www.geotiticaca.org/web/reportes-tecnicos/item/download/2\\_10556e0cd83934df9724e15ea6b92e17.html](http://www.geotiticaca.org/web/reportes-tecnicos/item/download/2_10556e0cd83934df9724e15ea6b92e17.html)
- Ebrahimi, M., & Taherianfard, M. (2011). The effects of heavy metals exposure on reproductive systems of cyprinid fish from Kor River - Aquatic Commons. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*. Retrieved from <http://aquaticcommons.org/22396/>
- Calvo, A., Oviedo, G., Yañez, G., & Zapata, W. (2012). *Toxicología de metales pesados*. La Paz.
- CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). *Water Quality Guideline es for the Protection of Aquatic Lifefor the Protection of Aquatic Life* (p. 13). p. 13. Retrieved from [https://www.ccme.ca/en/resources/canadian\\_environmental\\_quality\\_guidelines/index.html](https://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/index.html)
- Dirección Regional de Energía y Minas Puno. (2019). *Inspección y/o supervisión inopinada a la parte alta de la cuenca del río Suches*. Retrieved from <http://www.drempuno.gob.pe/es/node/99>
- Gao, X., Zhou, F., & Chen, C. T. A. (2014). Pollution status of the Bohai Sea: An overview of the environmental quality assessment related trace metals. *Environment International*, 62, 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.019>
- Garmendia, Joxe Mikel. Menchaca, I., Belunce, M. J., & Revilla, M. (2009). Protocolo del test de toxicidad de sedimentos marinos con larvas del erizo de mar. *Revista de Investigación Marina*, 11, 25. Retrieved from <https://issuu.com/aztitecnalia/docs/rim11>
- Hill, L., & Jooste, S. (1999). The effects of contaminated sediments of the Blesbok Spruit near Witbank on water quality and the toxicity thereof to *Daphnia pulex*. *Water Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00271-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00271-1)
- Navarro, J., & Rodríguez, J. (2012). *La pulga de agua: excelente recurso en la didáctica de la biología*. Retrieved from <http://www.clubcientificobezmiliana.org/pdf/Pulga.pdf>



- Ramirez, P., & Mendoza, A. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo* (Primera). Retrieved from [https://books.google.com.pe/books?id=wdJWUOj81isC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=wdJWUOj81isC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Souza, I. da C., Rocha, L. D., Morozesk, M., Bonomo, M. M., Arrivabene, H. P., Duarte, I. D., ... Fernandes, M. N. (2015). Changes in bioaccumulation and translocation patterns between root and leaf of *Avicennia schaueriana* as adaptive response to different levels of metals in mangrove system. *Marine Pollution Bulletin*, 94(1–2), 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.032>
- Valverde, E. (2015). Bioensayo Agudo con Sulfato de Cobre en *Alevinos de Carpa Cyprinus Carpio* (Linnaeus, 1758) y su posible impacto debido a la actividad minera (Universidad Nacional de Ingeniería). Retrieved from <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2186>
- Wang, H., Wang, J., Liu, R., Yu, W., & Shen, Z. (2015). Spatial variation, environmental risk and biological hazard assessment of heavy metals in surface sediments of the Yangtze River estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 93(1–2), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.01.026>
- Xia, F., Niu, X., Qu, L., Dahlgren, R., Zhang, M. (2021). Integrated source-risk and uncertainty assessment for metals contamination in sediments of an urban river system in eastern China. *CATENA*, 203, 105277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105277>
- 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>

**Artículo Recibido:** 9-01-2021

**Artículo Aceptado:** 05-07-2021

