



Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana

Health risks due to the presence of heavy metals in agricultural products cultivated in areas abandoned by gold mining in the Peruvian Amazon

Margarita Soto-Benavente¹ ; Liset Rodríguez-Achata¹ ; Martha Olivera¹ ; Víctor Arostegui Sánchez²; César Colina Nano²; Jorge Garate Quispe^{3,*} 

¹ Departamento Académico de Ciencias Básicas, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Av. Jorge Chávez 1160. Puerto Maldonado, Perú.

² Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Av. Jorge Chávez 1160. Puerto Maldonado, Perú.

³ Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals, secció Ecologia, Universitat de Barcelona, Av Diagonal 643, 08028 Barcelona, Spain.

Received September 22, 2019. Accepted February 25, 2020.

Resumen

El objetivo del estudio fue de analizar las concentraciones de As, Cd, Pb y Hg en suelos y productos agrícolas (plátano y yuca) en áreas abandonadas por minería aurífera, sureste de la Amazonía peruana. Se analizó la concentración y bioacumulación de metales pesados, según órgano de la planta (raíz, tallo, hoja y fruto). Se encontró que las concentraciones de Hg en suelo (< 0,01 mg/kg) fueron similares en plantaciones contaminadas y no contaminadas; mientras que las concentraciones de As, Cd y Pb fueron superiores en las contaminadas. Las concentraciones de As, Pb y Cd en yuca y plátano fueron superiores en las plantaciones contaminadas. En yuca se encontró una elevada acumulación de Pb y As en las raíces y tallos (> 2,9 mg/kg). En frutos de plátano se encontraron las concentraciones más bajas de todos los metales analizados (< 0,01 mg/kg). El grado de bioacumulación de As y Pb fue intenso para la yuca en sitios contaminados. Las concentraciones de As y Pb en raíces de yuca superan los niveles recomendados por la FAO/OMS. Por estas razones es esencial la evaluación, monitoreo y mayor control en la comercialización de productos agrícolas cultivados en zonas abandonadas por la minería aurífera para evitar la toxicidad en humanos.

Palabras clave: Bioacumulación; minería artesanal; *Manihot esculenta*; *Musa paradisiaca*; metales pesados; minería del oro.

Abstract

The present study aimed to determine the concentrations of As, Cd, Pb and Hg in soil and crops (banana and cassava) in areas abandoned by gold mining, southeast of the Peruvian Amazon. The concentration and bioaccumulation of heavy metals was analyzed, according to the plant organ (root, stem, leaf and fruit). Soil Hg concentrations (< 0.01 mg/kg) were found to be similar in contaminated and uncontaminated plantations; while the concentrations of As, Cd and Pb were higher in the contaminated ones. The concentrations of As, Pb and Cd in cassava and banana were higher in the contaminated plantations. In cassava, a high accumulation of Pb and As was found in the roots and stems (> 2.9 mg/kg). In banana fruits, the lowest concentrations of all the metals analyzed were found (< 0.01 mg/kg). The degree of bioaccumulation of As and Pb was intense for cassava in contaminated areas. The concentrations of As and Pb in cassava roots exceed the levels recommended by the FAO/WHO. For these reasons, evaluation, monitoring and greater control in the commercialization of agricultural products cultivated in areas abandoned by gold mining are essential to avoid toxicity in humans.

Keywords: Bioaccumulation; artisanal mining; *Manihot esculenta*; *Musa paradisiaca*, heavy metals; gold mining.

How to cite this article:

Soto-Benavente, M.; Rodríguez-Achata, L.; Olivera, M.; Arostegui, V.; Colina, C.; Garate, J. 2020. Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. Scientia Agropecuaria 11(1): 49-59.

* Corresponding author
E-mail: jgarate@ub.edu (J. Garate Quispe).

1. Introducción

La contaminación de suelos por metales pesados se considera un problema global (dos Santos *et al.*, 2015), generado principalmente por actividades humanas (Zhang *et al.*, 2019) como la industrialización, urbanización, actividades agrícolas, tecnológicas y mineras (dos Santos *et al.*, 2015; Londoño-Franco, 2016). Siendo la minería y las actividades de procesamiento de minerales las principales fuentes de contaminación de suelos (dos Santos *et al.*, 2015; Pérez-Sirvent *et al.*, 2017). Además, que, esta contaminación de los suelos tiende a generar serios problemas a la salud humana y al balance local de los ecosistemas (Doležalová *et al.*, 2019).

Por otro lado, la presencia de metales pesados y su acumulación en suelos agrícolas constituye un riesgo para la vida de los organismos y la salud humana (Gjoka *et al.*, 2010). Algunos metales (Co, Cr, Cu, Mn y Zn) en bajas concentraciones son importantes para funciones metabólicas en los humanos (Barraza *et al.*, 2018). Sin embargo, otros metales no tienen efectos beneficiosos en la salud humana, como el arsénico, cromo y cadmio que son considerados como elementos cancerígenos (Kim *et al.*, 2015; Barraza *et al.*, 2018) y el mercurio puede generar ataxia en adultos y déficit de lenguaje, atención y desempeño visuoespacial en niños (Tshala-Katumbay *et al.*, 2015). Mientras que el plomo es considerado como posiblemente cancerígeno (Kim *et al.*, 2015).

Como metales pesados se consideran a aquellos metales con una densidad mayor a 4 g/cm³ y peso atómico superior a 20 (Londoño *et al.*, 2016). Estudios sobre su concentración en suelos con uso agrícola son importantes debido a que puede generar efectos negativos en la salud humana (Londoño *et al.*, 2016; Abdalla *et al.*, 2013). Los metales pesados están disponibles para las plantas en el suelo, y estos metales pueden migrar hacia las capas inferiores del suelo y llegar hasta las aguas subterráneas (Micó, 2005), de esta forma también pueden estar disponibles y ser absorbidos por las raíces de las plantas. Por lo tanto, la calidad del suelo de actividades agrícolas debería ser monitoreada con la finalidad de generar líneas base para futuras comparaciones y detectar cambios en la calidad de los suelos debido a actividades humanas (Fincheira-Robles *et al.*, 2018).

Por otro lado, las actividades de minería a pequeña escala y artesanal en la Amazonía como parte de su proceso de aprovechamiento contaminan los suelos y el agua con metales pesados (González-Merizalde

et al., 2006). En el Perú el desarrollo varios proyectos mineros formales e informales generan la contaminación de agua y suelos, debido a que estas actividades generan relaves que se vierten ríos, lago y lagunas (Huaranga *et al.*, 2012). Además, mediante de la metilación de los metales pesados presentes en los suelos de la Amazonía (mercurio, plomo y arsénico) pueden ingresar a la cadena trófica, debido a que estos son liberados mediante la remoción del suelo por la minería aurífera (Brack *et al.*, 2011).

En Madre de Dios, la minería aurífera a pequeña escala representa una de las principales actividades económicas (INEI, 2018). Sin embargo, esta genera problemas sociales y ambientales; como la deforestación, erosión de suelos y liberación de metales pesados en fuentes de agua, que posteriormente infiltrándose en las redes tróficas y esto podría ocasionar riesgos en la salud humana (Osoreo *et al.*, 2012). Este tipo de minería, además de la contaminación de suelos, podría también contaminar los productos agrícolas (yuca, plátano, cacao, etc.) que se producen en ellos. Estos productos son expendidos en los mercados locales, por lo que se corre el riesgo de la acumulación de metales pesados en los pobladores locales y la posibilidad de generar un riesgo a la salud humana (cancerígenos y no cancerígenos). Esto representa uno de los principales problemas en salud pública y debe considerarse para el buen desarrollo, crecimiento social y económico. La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y el plátano (*Musa paradisiaca* L.) son plantas perennes cultivadas y distribuidas de forma amplia en zonas tropicales y subtropicales, y que es comercializada de forma intensiva por las poblaciones humanas locales (Alcantara *et al.*, 2017). Asimismo, debido a su gran aclimatación es uno de los productos más cultivados y consumidos en el mundo, después del arroz y el maíz (Mombo *et al.*, 2017).

La evaluación de los metales pesados como el cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y arsénico (As) es esencial debido a que además de ser tóxicos, son acumulables por los organismos, siendo a la vez fuente de alimentación en las redes trófica y son transferidos a cada uno de los eslabones de la cadena alimenticia (Prieto *et al.*, 2009).

El presente estudio es importante porque son escasos los estudios previos sobre los niveles de concentración en suelos degradados por actividades de minería aurífera en la Amazonía peruana; y menos aún sobre la biodisponibilidad de metales pesados en los productos agrícolas que se cultivan en

ellos. Además, que la valoración de los riesgos potenciales cancerígenos y no cancerígenos en la salud no han sido evaluados. Debido a que estos productos cumplen un rol importante en la seguridad alimentaria, creación de empleo e ingresos de las poblaciones de Madre de Dios. El objetivo del presente estudio fue evaluar el nivel concentración de metales pesados (Hg, Cd, As y Pb) en suelo y productos agrícolas en áreas degradadas por minería aurífera a pequeña escala en Madre de Dios, Perú, y los riesgos para la salud.

2. Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio fue realizado en la provincia de Tambopata, Madre de Dios (12°31'12" S y 69°12'58" O), sureste de la Amazonía Peruana. Las áreas evaluadas se localizaron entre 7-12 km de la ciudad de Puerto Maldonado (capital de la Provincia de Tambopata) y se encuentran a una altitud promedio de 194 m s.n.m. En el ámbito de estudio la temperatura media anual es 25,4 °C y la precipitación total anual en promedio es 2120 mm; con una estación seca de junio a septiembre (menos de 100 mm).

Se seleccionaron 2 sitios para la evaluación de metales pesados en suelo y productos agrícolas. El primero, un área abandonada por explotación de minería aurífera, denominado "La Pastora". El segundo, un sitio control que no ha sido impactado por actividad minera y no hay registros de esta actividad en las cercanías, denominado "comunidad de Infierno". En la Pastora se han desarrollado actividades minero-auríferas de forma informal e ilegal, así como agricultura de subsistencia y comercial.

Muestreo de suelo y productos agrícolas

Las muestras de suelos y productos agrícolas se colectaron en los 2 sitios evaluados (con actividad minera y sin actividad minera). La elección de las áreas muestreadas fue determinada en base a la presencia o no de cultivos de yuca y plátano. En cada sitio se seleccionó y delimitó 2 parcelas de 0,5 ha, una en la plantación de yuca y otra en la plantación de plátano (4 en total).

Para el suelo, se utilizó una muestra compuesta de 6 submuestras distribuidas de forma sistemática en la parcela. El suelo fue mezclado cuidadosamente y se guardó en bolsas de polietileno zip-lock. Para los productos agrícolas, las muestras fueron colectadas de 3 individuos según especies seleccionados aleatoriamente y guardada en bolsas de polietileno zip-lock. Para plátano se colectaron muestras de raíz, tallo, hojas y frutos; mientras que para la yuca solo se

colectaron raíz, tallo y hojas. Para cada parcela y según cultivo, las muestras de raíces, tallos, hojas y frutos se mezclaron cuidadosamente y se tomó una muestra compuesta para el análisis en laboratorio.

Análisis de laboratorio

La concentración de metales pesados en suelos y productos agrícolas fue determinada mediante espectrofotometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y Espectrometría de fluorescencia atómica con generación de Hidruros (GF-AFS). Los análisis de concentración de metales pesados (suelo y plantas) y la caracterización fisicoquímica de los suelos fueron realizados por el laboratorio CERPER (Certificaciones del Perú S.A.), acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL-Perú) bajo la norma NTP-ISO/IEC 17025.

Análisis riesgo para la salud

Demasiada exposición a metales pesados elevados tiene efectos crónicos (no-cancerígenos) en la salud humana (Xiao *et al.*, 2017). En el presente estudio se cuantificó el riesgo cancerígeno y no cancerígeno de los metales pesados (As y Pb) en la salud humana de adultos, vía ingestión de yuca, utilizando la metodología recomendada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2001; Doležalová *et al.*, 2019). El riesgo cancerígeno en los humanos es la probabilidad de desarrollar algún tipo de cáncer como resultado de la exposición a un carcinógeno potencial (Xiao *et al.*, 2017). La dosis diaria por la ingestión de alimentos contaminados (DDA) se calculó utilizando la Ecuación 1.

$$DDA = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (1)$$

Donde C es la concentración del metal pesado en el suelo (mg/kg); R_{ing} es la tasa de ingestión (mg/día); EF es la frecuencia de exposición (días/año); ED es la duración de la exposición (años); BW es el peso corporal (kg); AT es el tiempo promedio (días).

Para valorar el potencial del riesgo no-cancerígeno (HQ) debido a metales pesados se utilizó la Ecuación 2. Se utilizó la Ecuación 3 para cuantificar el riesgo cancerígeno (CR) de As y Pb. Si el HQ es <1 (USEPA, 2001), probablemente no existen riesgos de efectos no cancerígenos y si el HQ es > 1 los efectos adversos para la salud son posibles, y la probabilidad de efectos aumenta con los aumentos en los valores de HQ (Doležalová *et al.*, 2019). Si el CR < 10^{-6} indica que no hay riesgo cancerígeno (USEPA, 2001); si $CR < 10^{-4}$ el riesgo es considerado como aceptable; sin embargo, $CR > 10^{-4}$ sugiere un alto riesgo para desarrollar cáncer en humanos (Ahn *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019).

$$HQ = DDA/RFD \quad (2)$$

Donde DDA es la dosis diaria por la ingestión de alimentos contaminados; RFD es la dosis oral de referencia de elementos no-cancerígenos y esta es diferente según cada metal pesado (Hg = 0,0001, As = 0,0003, Cd = 0,0005 y Pb = 0,0035) (Doležalová *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019).

$$CR = DDA \times SF \quad (3)$$

Donde: CR es el índice de riesgo cancerígeno de As y Pb; SF es el factor de pendiente del cáncer (Hg = 0,035, As = 1,5, Cd = 0,006 y Pb = 0,0085) (Doležalová *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019).

Análisis de datos

Para la determinación del índice de bioacumulación de metales pesados se utilizó el método adaptado por Mas y Azcue (1993), la cual se calcula mediante la relación entre la concentración de un metal pesado en las plantas y la concentración del mismo metal en el suelo. Para su interpretación se utilizó el grado de acumulación definido como: menor de 10^{-3} = carencia, hasta 10^{-2} = ligera, hasta 10^{-1} = media y hasta 10^1 = intensa.

Se comparó la concentración de metales pesados en suelos con los límites máximos permisibles establecidos por la legislación peruana, estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos agrícolas Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM (MINAM,

2017). Para evaluar los niveles de toxicidad en las plantas estudiadas, se comparó con los propuestos por Kabata-Pendias y Mukhe (2007).

Se calculó el índice de geoacumulación (Ecuación 4) para evaluar el nivel de contaminación en el suelo. Este índice fue propuesto por Müller (1969), como un criterio utilizado para comparar la concentración de metales encontrados en los sitios contaminados con valores de referencia de sitio no contaminados.

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{CM_i}{1,5 \times B_i} \right) \quad (4)$$

Donde I_{geo} es el índice de geoacumulación; CM_i es la concentración del metal pesado en estudio; y B_i los valores de concentración de referencia.

3. Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica de los suelos

En las plantaciones de yuca, en la zona control y con minería el pH del suelo fue ácido, probablemente debido a la presencia del aluminio (Tabla 1). En la zona control los suelos fueron francos, mientras que en la zona con minería fueron franco-limoso, producto de la sedimentación de suelos y arrastre por agua del material particulado.

Tabla 1

Caracterización fisicoquímica del suelo en las plantaciones de yuca y plátano en áreas abandonadas por minería y control. MO: Materia orgánica, CE: Conductividad eléctrica, CIC: Capacidad de intercambio catiónico

Parámetros	Plantación de Yuca		Plantación de plátano	
	Con Minería (La Pastora)	Sitio Control (Infierno)	Sitio con Minería (La Pastora)	Sitio Control (Infierno)
pH	5,52	5,13	6,69	5,04
MO (%)	0,99	1,42	2,01	1,39
CO ₂ Ca (%)	< 0,10	< 0,10	1,19	< 0,10
CE (ds/m)	0,26	0,24	0,38	0,23
P disponible (mg/kg)	10,0	14,2	1,8	13,1
K disponible (mg/kg)	82	62	92	59
Análisis textural	franco limoso	franco	franco limoso	franco
Arena (%)	14	47	16	48
Limo (%)	70	40	64	40
Arcilla (%)	16	12	20	12
CIC	6,30	3,83	11,2	3,82
Cationes cambiables				
Ca (mg/100 g)	4,23	1,59	8,54	1,69
Mg (mg/100 g)	1,08	0,84	1,48	0,90
K (mg/100 g)	0,36	0,32	0,40	0,35
Na (mg/100 g)	0,8	0,57	0,77	0,59
Al (mg/100 g)	0,02	0,11	< 0,05	0,11
Suma de cationes (mg/100)	6,17	3,45	11,19	3,62
Elementos disponibles				
Ca (mg/kg)	1352	506	2462	510
Mg (mg/kg)	209	167	265	169
SO ₄ (mg/kg)	107	91,2	38,5	92,2
B (mg/kg)	0,73	0,73	0,99	0,78
Cu (mg/kg)	2,43	0,61	2,04	0,64
Fe (mg/kg)	96,1	46,8	73,8	49,8
Mn (mg/kg)	7,41	13,5	5,41	14,6
Zn (mg/kg)	0,86	1,20	1,12	1,40

La capacidad de intercambio catiónico fue superior en la zona con minería, con altos valores de cationes intercambiables de Ca y Mg (importantes para la fertilidad de los suelos); aunque su concentración indicaría que existe saturación de bases, so_4^{2-} y Fe (Tabla 1).

En las plantaciones de plátano, los suelos fueron menos ácidos en la plantación con minería (pH = 6,69) que en el control (pH = 5,04). La acidez del suelo y la mayor concentración de bases libres (CO_2Ca) en las plantaciones de la zona minera, estarían generando condiciones para que los metales pesados se mantengan en el suelo. Por lo tanto, se encontró una mayor capacidad de intercambio catiónico en la plantación con minería, debido a la presencia de iones y materia orgánica (Tabla 1).

Es importante mencionar que debido a la mayor proporción de partículas de menor tamaño (limo y arcillas) en las plantaciones con minería que en la plantación control (Tabla 1) existiría una retención de materia orgánica, agua y gases en estos suelos, ocasionando una mayor retención de los metales pesados.

Metales pesados en suelo

La concentración de mercurio en suelo fue similar entre las 4 plantaciones evaluadas (< 0,01 mg/kg). La concentración de arsénico, cadmio y plomo fueron superiores en las zonas con minería (Tabla 2). En la zona sin minería se encontró un 42% menos de arsénico y 35% menos de plomo. Mientras que, la concentración de cadmio fue muy inferiores en la plantación control (< 0,02 mg/kg) que la plantación con minería (> 0,79 mg/kg).

Las concentraciones encontradas de metales pesados en suelo de las plantaciones agrícolas de yuca y plátano son inferiores a los establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental peruano (Tabla 2).

Por otro lado, los resultados encontrados en el presente estudio difieren con los encontrados por Velásquez-Ramírez *et al.* (2020) en Madre de Dios, que encontró diferencias en la concentración de metales pesados entre áreas impactadas por minería aurífera y áreas no impactadas. Debido a que Velásquez-Ramírez *et al.* (2020) encontraron una mayor proporción de arsénico, cadmio y plomo en las áreas no impactadas por minería, mientras que aquí se encontró una mayor concentración de estos metales en las áreas con actividad minera (Tabla 2). En el presente estudio la concentración de mercurio en suelo fue inferior a 0,01 mg/kg, similar a los reportado por otros estudios en Madre de Dios (Velásquez-Ramírez *et al.*, 2020; Huayllani, 2017). La concentración de arsénico y plomo en suelo en el presente estudio fueron superiores a los reportados por Velásquez-Ramírez *et al.* (2020) y Huayllani (2017), mientras que los valores de cadmio encontrados fueron inferiores a estas (Tabla 2).

Sin embargo, debido a las características fisicoquímicas de los sitios evaluados se considera la posibilidad de la permanencia de estos metales en los suelos. Debido a que los metales pesados dependen de la cantidad de materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, presencia de carbonatos y textura de suelo; los cuales facilitarían la disponibilidad de estos metales para las plantas y movilidad de los metales a capas inferiores del suelo. Así, los metales pesados serían absorbidos por los productos agrícolas, como la yuca y plátano.

Por otro lado, los niveles de mercurio, cadmio, arsénico y plomo en suelos agrícolas de yuca y plátano de la zona con minería y la zona control no sobrepasaron los estándares peruanos de calidad para suelo agrícola (Tabla 2).

Tabla 2

Concentración de metales pesados en suelos de las plantaciones evaluadas según sitio (control y con minería). ECA: Estándares de calidad ambiental peruano para suelos agrícolas (MINAM, 2017)

Producto agrícola	Sitio	Metales pesados, mg/kg			
		Hg	As	Cd	Pb
Plantación de yuca	Con minería (La Pastora)	< 0,01	6,27	0,79	12,6
	Sitio Control (Infierno)	< 0,01	2,94	< 0,02	5,78
Plantación de Plátano	Con minería (La Pastora)	< 0,01	6,56	0,85	9,39
	Sitio Control (Infierno)	< 0,01	4,47	< 0,02	8,65
Índice de geoacumulación (IGeo)		-	0,51	-	0,54
Velásquez-Ramírez <i>et al.</i> (2017) 2020		-	-	-	-
- minería		No detectado	1,90	2,22	4,60
Huayllani (2017) minería		No detectado	0,58	0,67	3,55
ECA		6,60	50	1,4	70

Además, considerando los valores del índice de geoacumulación (I_{geo}) para Hg y As (Tabla 2), los suelos de las plantaciones de yuca son consideradas como suelos no contaminadas a moderadamente contaminados (valores de I_{geo} entre 0 a 1) (Liang *et al.*, 2015).

Metales pesados en productos agrícolas

Las concentraciones de mercurio en raíz, tallo y hoja de yuca fueron superiores en las plantaciones contaminadas por minería ($> 0,17$ mg Hg/kg) que en los no contaminados ($< 0,01$ mg Hg/kg) (Tabla 3). En el sitio sin minería, el tallo de yuca (0,083 mg Hg/kg) fue el órgano con mayor acumulación de mercurio y la raíz el menor (0,018 mg Hg/kg). Sin embargo, en el plátano los niveles más bajos de mercurio se encontraron en los frutos ($< 0,002$ mg Hg/kg) y hojas ($< 0,10$ mg Hg/kg), mientras que los mayores niveles de mercurio se encontraron en las raíces ($> 0,45$ mg Hg/kg en los sitios con minería). Los resultados sugieren que en el plátano la mayor acumulación el mercurio es en las raíces y tallos (Tabla 3), lo cual no generaría riesgos en la salud humana debido a que son los frutos del plátano los que se consumen y no los tallos y raíces.

Las concentraciones más elevadas de arsénico se encontraron en las raíces y tallos de yuca ($> 2,9$ mg As/kg). Mientras que la concentración más baja de arsénico fue en hojas de yuca y plátano ($< 0,05$ mg As/kg), y frutos de plátano ($< 0,006$ mg As/kg). Por otro lado, los niveles de arsénico fueron superiores en los sitios con minería. Nuestros resultados sugieren una mayor acumulación de arsénico en raíz y tallo para la yuca, y en raíces de plátano. Esta acumulación del arsénico a los niveles inferiores de la planta podría ser un mecanismo de defensa ante la sensibilidad del metal pesado. Se encontraron diferencias en la acumulación de Cd entre los órganos de las especies evaluadas y entre sitios. En yuca los niveles más altos de Cd se encontraron en las hojas, mientras que en el plátano los mayores

niveles de cadmio se encontraron en las raíces (Tabla 3). En general, las plantaciones en los sitios con minería presentaron los niveles más altos de cadmio. Es interesante mencionar que en los frutos de plátano se encontraron los niveles más bajos cadmio. Para las 2 especies estudiadas, las plantaciones ubicadas en los sitios con minería presentaron los niveles más altos de plomo. En la yuca los órganos con mayor acumulación de plomo fueron la raíz y tallo ($> 5,7$ mg/kg). En el plátano, la raíz fue el órgano con mayor acumulación de plomo (Tabla 3). Las concentraciones de metales pesados reportados para yuca y plátano en el presente estudio son inferiores a los rangos de toxicidad, propuestos por Kabata-Pendias y Mukhe (2007). Lo cual sugiere que las concentraciones de metales pesados encontrados no tendrían efectos tóxicos en las plantas evaluadas. Sin embargo, en la raíz yuca las concentraciones de arsénico y plomo superan los límites máximos aceptables para alimentos establecidos por la FAO-OMS (2018), en 30 y 58 veces más, respectivamente (Tabla 3). Similares resultados para la yuca fueron encontrados por Barraza *et al.* (2018) en plantaciones de yuca en la Amazonía Ecuatoriana y Kalagbor *et al.* (2015) y Mombo *et al.* (2016) en plantaciones de Nigeria. Por lo tanto, representaría un riesgo para las poblaciones locales consumir la yuca proveniente de estas plantaciones, en especial para el segmento más vulnerable de la población como los niños (Kalagbor *et al.*, 2015).

Mientras que la concentración de metales en los frutos de plátano no superó los límites máximos aceptables para alimentos establecidos por la FAO-OMS (2018) (Tabla 3). Similares resultados en el plátano fueron reportados por Barraza *et al.* (2018) en plantaciones de la Amazonía Ecuatoriana. La absorción de metales pesados del suelo y la acumulación varía entre especies y órganos vegetales (Baker, 1981; Barceló *et al.*, 2003).

Tabla 3

Concentración de metales pesados (Hg, As, Cd y Pb) según sitio de evaluación (con minería y control) y órganos en yuca y plátano. En letra negra se resalta el órgano de la planta consumida por la población. En asterisco (*) se muestran los que superaron los límites máximos permisibles de la FAO-OMS

Producto agrícola	Metal pesado	Raíz mg/kg		Tallo mg/kg		Hoja mg/kg		Fruto mg/kg		RT	FAO-OMS Límite máximo (mg/kg)
		Con minería	Control	Con minería	Control	Con minería	Control	Con minería	Control		
yuca	Hg	0,018	< 0,010	0,083	< 0,010	0,04	< 0,010			1-3	0,1
	As	2,952*	0,050	2,942	0,199	< 0,070	< 0,050			5-20	0,1
	Cd	0,039	< 0,020	0,38	< 0,020	0,2145	0,125			5-30	0,1
	Pb	5,813*	0,022	5,782	0,279	0,050	0,020			30-300	0,1
plátano	Hg	0,451	0,281	0,020	0,177	< 0,010	< 0,010	< 0,002	< 0,002	1-3	0,1
	As	0,820	0,653	< 0,053	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,006	< 0,006	5-20	0,1
	Cd	0,155	0,177	0,040	0,003	< 0,020	< 0,020	< 0,005	< 0,005	5-30	0,05
	Pb	1,078	0,847	0,073	0,040	0,210	0,025	< 0,01	< 0,01	30-300	0,1

TR = Rango de Toxicidad en plantas (Kabata-Pendias y Mukhe, 2007). FAO-OMS = Norma sobre los "Límites Máximos permisibles para contaminantes y toxinas en alimentos, establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Organización Mundial de la Salud" (FAO-OMS, 2018).

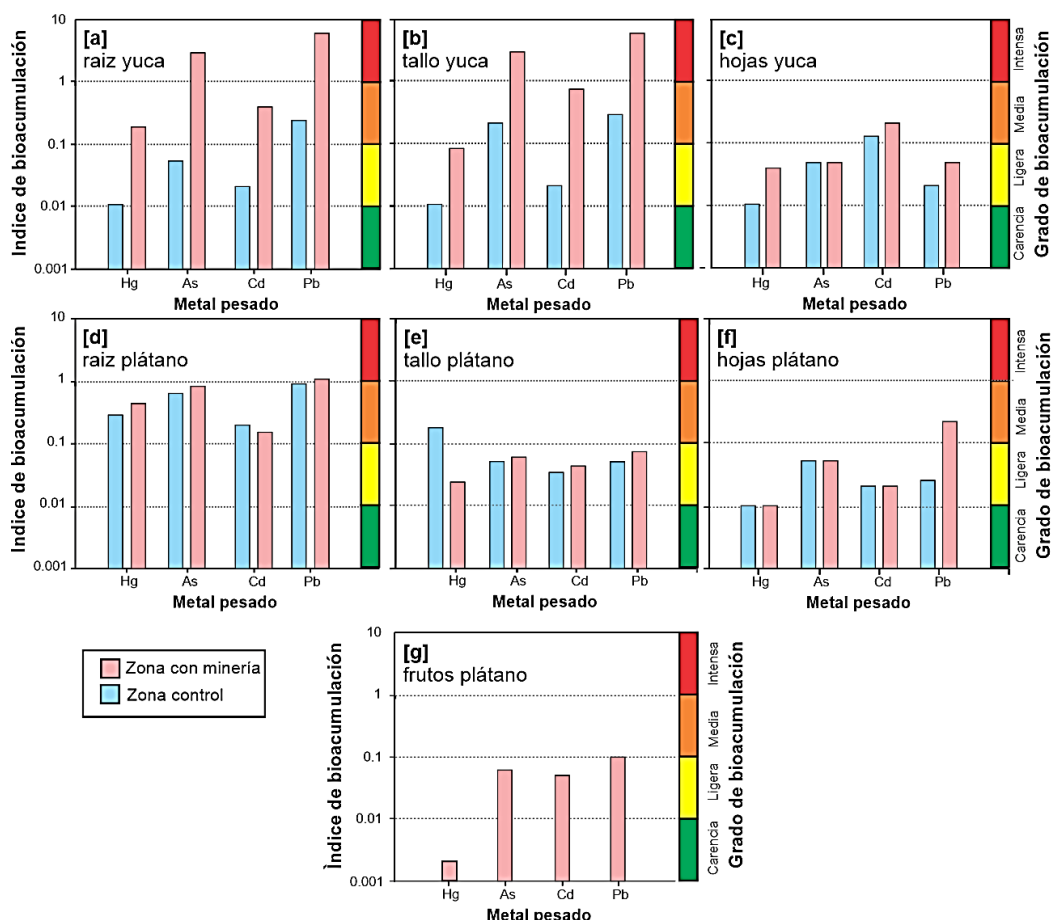


Figura 1. Grado de bioacumulación de metales pesados en yuca y plátano, según órgano sitio de plantación (con actividad minera y control), Madre de Dios, Perú.

Los resultados del presente estudio sugieren que la yuca y el plátano son especies acumuladora de arsénico y plomo, debido a que una mayor concentración en raíces, lo cual caracteriza a una especie acumuladora (Barceló *et al.*, 2003). Sin embargo, la yuca utilizaría un mecanismo de exclusión con el cadmio (Barceló *et al.*, 2003), es decir acumula este metal a las hojas; diferente respuesta encontrada en el plátano, que también puede ser considerada como acumuladora de cadmio por su mayor acumulación de este metal en las raíces.

Valenzuela y Quispe (2017) evaluaron los niveles de plomo y cadmio en raíces de yuca consumidos en la ciudad Satipo (Amazonía Peruana). Los niveles de plomo reportados en el presente estudio son superiores a los reportados por Valenzuela y Quispe (2017) en promedio 0,13 mg Pb/kg, mientras que los niveles cadmio fueron similares. Asimismo, similar a lo reportado en el presente estudio, Huayllani (2017) encontró una mayor concentración de plomo en raíces de *Apeiba membranacea*, *Ochroma pyramidale*, *Ceiba pentandra* y *Erythrina*

ulei en zonas con actividad mineras en Madre de Dios (Perú) (Tabla 3).

Por otro lado, la mayor concentración de plomo encontrada en las plantaciones con minería en la yuca (raíz y tallo) y plátano (raíz, tallo, hoja y fruto), estaría relacionado a la conformación geológica del sitio y a la mayor presencia y circulación de vehículos motorizados que en el sitio control. Debido a que las parcelas se encontraban cercanas a carreteras (Xiong *et al.*, 2016; Mombo *et al.*, 2017).

Bioacumulación de metales pesados según órgano de la planta

En la yuca, se encontró que el grado de bioacumulación de metales en la raíz y tallo fue superior en las zonas con minería previa (Figura 1a, b).

En la zona con minería se encontró una bioacumulación intensa en arsénico y plomo, mientras que para el mercurio y cadmio se encontró una bioacumulación media (Figura 1a, 1b). En hojas, el grado de bioacumulación de mercurio (ligera) y plomo fue superior en la plantación en zona mi-

nera. Mientras que el grado de bioacumulación de arsénico (ligera) y cadmio (media) fue similar entre ambos sitios (Figura 1c).

En el cultivo de plátano, el grado de bioacumulación de arsénico y cadmio en raíz (media), plátano (ligera) y hojas (ligera) fueron similares (Figura 1a, 1b, 1c). Se encontró una diferencia en el grado de bioacumulación de mercurio y plomo entre ambos sitios de estudio. Siendo mayor para el grado de bioacumulación de mercurio (ligera) en la zona sin minería, mientras que el grado de bioacumulación de plomo (media) fue superior en la zona con minería (Figura 1d, 1e, 1f). Por otro lado, el grado de bioacumulación en frutos de plátano de arsénico, cadmio y plomo en la zona minera fue ligero, mientras que el grado de bioacumulación de mercurio fue de carencia (Figura 1g).

El grado de bioacumulación de arsénico y plomo en productos agrícola de la zona minera se encuentran en un grado intenso para la yuca y en un grado medio para el plomo para frutos del plátano. Esta diferencia es debido a que la capacidad de bioacumular metales varía según las especies y la naturaleza de los metales pesados (Vig *et al.*, 2003).

La intensa bioacumulación de plomo y arsénico por la yuca en la plantación con minería es debido a que esta es considerada una bioacumuladora de metales (Kalagbor, 2015). Varios estudios han encontrado una mayor bioacumulación de metales en áreas contaminadas que en suelo no impactados (Idodo-Umech y Ogbeibu, 2010; Křibek *et al.*, 2014; Mombo *et al.*, 2016), resultados similares a los reportados en el presente estudio. Sin embargo, estos los resultados encontrados en el presente estudio difieren de los encontrados por Křibek *et al.* (2014) en área impactada por minería en Zambia, que encontró una mayor concentración de metales en las que hojas que en las raíces. En el presente estudio, para la yuca la mayor acumulación de metales pesados (Hg, As y Pb) se encontró en las raíces que en las hojas. Similares resultados fueron reportados por Harrison *et al.* (2018) en suelos contaminado por aceites crudos en Nigeria. Asimismo, en el estudio de Alcántara *et al.* (2017) reportan una mayor acumulación de Hg en las raíces, debido a su elevada tolerancia a suelos contaminados por Hg. Estos resultados son preocupantes, debido a que la raíz de la yuca es el órgano vegetativo de consumo humano masivo en Madre de Dios. Su consumo por la población local es de regular a constante y es ampliamente comercializado en los mercados locales. Más aun considerando

que la absorción de metales pesados por las plantas es la primera etapa para el ingreso en la cadena alimenticia (Kabata-Pendias y Mukhe, 2007). El plomo en los humanos genera efectos graves en diferentes órganos e influye en la capacidad mental y desarrollo de los niños (Londoño-Franco *et al.*, 2016), demostrado por un estudio realizado en la Amazonía peruana (Anticona y San Sebastian, 2014). Mientras que el arsénico este clasificado como una sustancia cancerígena, y su toxicidad crónica puede generar lesiones vasculares y de la piel (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

Las especies hiper-acumuladoras de metales suelen tener una biomasa reducida, debido a que utilizan más recursos en los mecanismos de adaptación a las elevadas concentraciones de los metales pesados en sus tejidos (Kabata-Pendias y Mukhe, 2007). Esta podría ser una de las razones por las cuales en el presente estudio no se encontraron altos niveles de bioacumulación en los órganos superiores de las especies estudiadas (frutos del plátano), debido a que estas presentan una biomasa abundante. En el proceso de acumulación de metales en la planta los metales disminuyen su concentración hacia las partes superiores de la planta; sin embargo, esto estaría influenciando en una mayor bioacumulación en las raíces de la yuca (producto comestible).

Riesgo en la salud

Se estimaron los riesgos en la salud humana (cancerígenos y no cancerígenos) como producto del consumo de yuca proveniente de sitios contaminados por metales pesados (Hg, As, Cd y Pb). Los valores del riesgo cancerígeno y no-cancerígeno se mostraron la siguiente manera $As > Pb > Hg > Cd$ (Tabla 4). En Hg y Cd probablemente no existan riesgos de efectos no cancerígenos, debido a que no superaron los valores máximos admisibles ($HQ < 1$, Tabla 4) (USEPA, 2001; Doležalová *et al.*, 2019). Sin embargo, el As y el Pb superaron el límite máximo admisible por la USEPA (2001) ($HQ > 1$, Tabla 4). Por lo tanto, es probable que existan efectos no cancerígenos en la salud humana debido al As y Pb (Xiao *et al.*, 2017), además es importante resaltar que el As representa el mayor riesgo de toxicidad sería debido su elevado $HQ (>13)$ (Doležalová *et al.*, 2019).

El índice de riesgo cancerígeno de As ($CR = 5,98 \times 10^{-3}$) fue superior que los otros metales evaluados (Tabla 4b), el $CR > 10^{-4}$ sugiere que el As, en el presente estudio, representa un alto riesgo para desarrollar cáncer en humanos (Shen *et al.*, 2019), Similares resultados fueron reportados por

Ahn et al. (2019) en áreas afectadas por minería en Korea. Por otro lado, en Pb encontramos un riesgo cancerígeno aceptable ($CR < 10^{-4}$, Tabla 4b) (Xiao et al., 2017). Mientras que en Hg y Cd no hay riesgo de potencial cancerígeno ($CR < 10^{-6}$, Tabla 4b).

Tabla 4

Valores de riesgo (a) no-cancerígeno y (b) cancerígeno calculados sobre metales pesados debido al consumo de yuca proveniente de áreas con actividad minera

(a) Potencial de riesgo no cancerígeno (HQ)	
Contaminante	raíz de yuca
Hg	$2,43 \times 10^{-4}$
As	13,29
Cd	$1,05 \times 10^{-4}$
Pb	2,24
(b) Índice de riesgo cancerígeno (CR)	
Contaminante	raíz de yuca
Hg	$8,51 \times 10^{-10}$
As	$5,98 \times 10^{-3}$
Cd	$1,46 \times 10^{-10}$
Pb	$3,39 \times 10^{-6}$

Los resultados aquí sugieren que la comercialización de productos agrícolas procedentes de las zonas con actividades mineras necesitaría una evaluación, monitoreo y mayor control en su comercialización. Además, se debería ayudar a las poblaciones locales a adoptar mejores prácticas de agricultura (Shen et al., 2019). Asimismo, se recomienda evitar en lo posible establecer plantaciones de yuca en áreas abandonadas o con impacto previo por minería aurífera en Madre de Dios. Aunque los niveles metales pesados encontrados en el presente estudio son bajos, el consumo constante de los mismos se bioacumula en los organismos, por tanto, los riesgos cancerígenos (As) y no cancerígenos (As y Pb) afectan a la salud pública local por el consumo constante de estos productos; aún más que el consumo per cápita de yuca en la Amazonía peruana es 24,3 kg/año y de plátano es 104 kg/año (INEI, 2018). Además, la producción de yuca y plátano en Madre de Dios en el 2018 fue de 12765 toneladas y 25764 toneladas, respectivamente (INEI, 2018). En estas condiciones los productos agrícolas provenientes de zonas mineras son un potencial recurso de toxicidad por metales pesados (Mlay y Mgumia, 2008). Por estas razones, es necesario realizar más estudios sobre los niveles de metales pesados en los suelos y productos agrícolas en estos productos, con la finalidad de evitar la toxicidad en la flora, fauna y las poblaciones humanas locales. En Madre de Dios, para mejorar nuestro conocimiento sobre los beneficios nutritivos y los riesgos para la salud debido al consumo de yuca se necesitan más estudios. Se recomienda (1)

la remediación de los suelos de estas áreas contaminadas, (2) los agricultores deberían evitar plantar yuca en áreas contaminadas por la minería aurífera y (3) los residentes locales deberían evitar consumir productos que provengan de áreas contaminadas.

4. Conclusiones

El nivel de concentración de metales pesados (Hg, Cd, As y Pb) en suelos, muestras de yuca y plátano de zona minera y zona control no sobrepasaron los estándares nacionales e internacionales (EPA) para el consumo humano. El grado de bioacumulación de arsénico y plomo en productos agrícola de la zona minera se encuentran en un grado intenso para la yuca. La yuca es acumuladora de arsénico y plomo. El plátano es acumulador de arsénico, plomo y cadmio. Considerando los procesos de bioacumulación en organismos, estos niveles se pueden considerar peligrosos para la salud de los pobladores locales, debido a la alta demanda y comercialización de estos productos. En general, los datos reportados en el presente estudio resaltan que la actividad minera en Madre de Dios no produce únicamente contaminación en los ríos y suelos, sino que también puede generar un riesgo en los productos agrícolas de consumo humano.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD) por el financiamiento de la presente investigación, aprobada con resolución N° 327-2014-UNAMAD-CI-CU.

ORCID

M. Soto-Benavente  <https://orcid.org/0000-0003-2850-7340>
 J. Garate-Quispe  <https://orcid.org/0000-0002-2904-8097>
 M. Olivera  <https://orcid.org/0000-0002-7789-6445>
 L. Rodriguez-Achata  <https://orcid.org/0000-0002-7494-2274>

Referencias bibliográficas

- Abdalla, M.; Hassabo, A.; Elsheikh. 2013. Assessment of some heavy metals in waste water and milk of animals grazed around sugar cane plants in Sudan. Livestock Research for Rural Development 25: abda25212.
- Ahn, Y.; Yun, H.; Pandi, K.; Park, S.; Ji, M.; Choi, J. 2020. Heavy metal speciation with prediction model for heavy metal mobility and risk assessment in mine-affected soils. Environmental Science and Pollution Research 27(3): 3213-3223.
- Alcantara, H.; Doronila, A.; Kolev, S. 2017. Phytoextraction potential of *Manihot esculenta* Crantz. (cassava) grown in mercury and gold-containing biosolids and mine tailings. Minerals Engineering 114: 57-63
- Anticona, C.; San Sebastian, M. 2014. Anemia and malnutrition in indigenous children and adolescents of the Peruvian Amazon in a context of lead exposure: a cross-sectional study. Global Health Action 7: 22888.

- Baker, A. 1981. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal Plant Nutrition* 3(1-4): 643-654.
- Barraza, F.; Maurice, L.; Uzu, G.; Becerra, S.; López, F.; Ochoa-Herrera, V.; Ruales, V.; Schreck, E. 2018. Distribution, contents and health risk assessment of metal(loid)s in small-scale farms in the Ecuadorian Amazon: An insight into impacts of oil activities. *Science of the Total Environment* 622-623: 106-120.
- Brack, A.; Ipenza, C.; Alvarez, J.; Sotero, V. 2011. Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio - Una Bomba de Tiempo. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 54 pp.
- Doležalová, H.; Mihočová, S.; Chovanec, P.; Pavlovský, J. 2019. Potential Ecological Risk and Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Industrial Affected Soils by Coal Mining and Metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International journal of environmental research and public health* 16(22): 4495.
- dos Santos, V.; Varón-López, J.; Fonsêca, C.; Lopes, P.; Siqueira, J.; de Souza, F. 2016. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 6735-6748.
- FAO-OMS 2018. Codex Alimentarius Commission on contaminants in foods, Twelfth Session Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations – World Health Organization. Utrecht, The Netherlands. 169 pp.
- Finciera-Robles, P.; Martínez-Salgado, M.; Ortega, R.; Janssens, M.; Parada-Ibañez, M. 2018. Soil quality indicators in table grape (*Vitis vinifera* cv. Thompson seedless) crops under integral nutrition management. *Scientia Agropecuaria* 9(2): 17-24.
- González-Merizalde, M.; Menezes-Filho, J.; Cruz-Erazo, C.; Bermeo-Flores, S. 2016. Manganese and Mercury Levels in Water, Sediments, and Children Living Near Gold-Mining Areas of the Nangaritza River Basin, Ecuadorian Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 71(2): 171-182.
- Gjoka, F.; Felix-Henningsen, P.; Wegener, H.; Salillari, I.; Beqiraj, A. 2010. Heavy metals in soils from Tirana (Albania). *Environmental Monitoring and Assessment*, 172: 517-527.
- Harrison, U.; Osu, J.; Ekanem, J. 2018. Heavy Metals Accumulation in Leaves and Tubers of Cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) Grown in Crude Oil Contaminated Soil at Ikot Ada Udo, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 22(6): 845-851.
- Huayllani, M. 2017. Presencia de metales pesados en la estructura vegetal de *Apeiba membranacea*, *Ochroma pyramidale*, *Ceiba pentandra*, *Erythrina ulei* instaladas en áreas intervenidas por la minería aurífera en el sector Manuani-Inambari-Tambopata-Madre de Dios. Tesis de grado, Universidad Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado. Perú. 96 pp.
- Huaranga, F.; Méndez, E.; Quilcat, V.; Huaranga, F. 2012. Pollution by heavy metals in the Moche River Basin, 1980-2010, La Libertad, Peru. *Scientia Agropecuaria* 3(3): 235-247.
- Idodo-Umech, G.; Ogbeibu, A. 2010. Bioaccumulation of the heavy metals in cassava tubers and plantain fruits grown in soils impacted with petroleum and non-petroleum activities. *Research Journal of Environmental Sciences* 4(1): 33-41.
- INEI-Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2018. Disponible en <https://www.inei.gob.pe>
- Kabata-Pendias, A.; Mukherjee, A. 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer. London, England. 403 pp.
- Kalagbor, A.; Dighi, N.; James, R. 2015. Levels of some heavy metals in cassava and plantain from farmlands in Kaani and Kpean in Khana Local Government Area of Rivers State. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 7: 22888.
- Kim, H.; Kim, Y.; Seo, Y. 2015. An Overview of Carcinogenic Heavy Metal: Molecular Toxicity Mechanism and Prevention. *Journal of Cancer Prevention* 20(4): 232-240.
- Kříbek, B.; Majera, V.; Kněsla, I.; Nyambeb, I.; Mihaljević, M.; Ettler, V.; Sracek, O. 2014. Concentrations of arsenic, copper, cobalt, lead and zinc in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) growing on uncontaminated and contaminated soils of the Zambian Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences* 99(2): 713-723.
- Londoño-Franco, L.; Londoño-Muñoz, P.; Muñoz-García, F. 2016. Risk of heavy metals in human and animal health. *Biocombustibles en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14(2): 145-153.
- Mas, A.; Azcue, J. 1993. Metales en sistemas biológicos. Promociones y Publicaciones Universitarias S.A. Barcelona, España. 324 pp.
- Micó, C. 2005. Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante. Tesis de doctorado, Universidad de Valencia, Valencia, España. 508 pp.
- MINAM - Ministerio del Ambiente. 2017. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Suelo. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM.
- Mlay, P.; Mgunia, Y. 2008. Levels of lead and copper in plasma of dairy cows, pastures, soil and water from selected areas of Morogoro suburbs, Tanzania. *Livestock Research for Rural Development* 20: 20060.
- Mombo, S.; Dumat, C.; Shahid, M.; Schreck, E. 2017. A socio-scientific analysis of the environmental and health benefits as well as potential risks of cassava production and consumption. *Environmental Science and Pollution Research* 24(6): 5207-5221.
- Müller, G. 1969. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine river. *Geojournal* 2: 108-118.
- Liang, J.; Liu, J.; Yuan, X.; Zeng, G.; Lai, X.; Li, X.; Wu, H.; Yuan, Y.; Li, F. 2015. Spatial and temporal variation of heavy metal risk and source in sediments of Dongting Lake wetland, mid-south China. *Journal of Environmental Science and Health* 50(1): 100-108.
- Osores, F.; Rojas, J.; Lara, M.; Hermógenes, C. 2012. Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Médica Peruana* 29(1): 38-42.
- Pérez-Sirvent, C.; Hernández-Pérez, C.; Martínez-Sánchez, M.; García-Lorenzo, M.; Bech, J. 2017. Metal uptake by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Journal of Soils and Sediments* 17: 1384-1393.
- Barceló, J.; Poschenrieder, C. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science* 2(3): 333-344.
- Prieto, J.; González, C.; Román, A.; Prieto, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 29-44.
- Shen, Z.; Xu, D.; Li, L.; Wang, J.; Shi, X. 2019. Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China. *Environmental Science and Pollution Research International* 26(15): 15698-15709.
- Tshala-Katumbay, D.; Mwanza, J.; Rohlman, D.; Maestre, G.; Oria, R. 2015. A global perspective on the influence of environmental exposures on the nervous system. *Nature* 527: 187-192.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2001. Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III—Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. Washington, USA.
- Valenzuela, O.; Quispe, J. 2017. Determinación cuantitativa de plomo y cadmio en diez tipos de yuca (*Manihot esculenta*) comercializadas en el mercado del distrito de San Martín de Pangoa, de la ciudad de Satipo, departamento de Junín, de enero a marzo de 2017. Tesis Grado, Universidad Wiener, Lima. Perú.
- Velásquez-Ramírez, G.; Barrantes, J.; Thomas, E.; Miranda, L.; Pillaca, M.; Tello, L.; Bazan, L. 2020. Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon. *Catena* 189: 104454.

- Vig, K.; Megharaj, M.; Sethunathan, N.; Naidu, R. 2003. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. *Advances in Environmental Research* 8(1): 121-135.
- Xiao, R.; Wang, S.; Li, R.; Wang, J.; Zhang, Z. 2017. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 141: 17-24.
- Xiong, T.; Dumat, C.; Pierart, A.; Shahid, M.; Kang, Y.; Li, N.; Bertoni, G.; Laplanche, C. 2016. Measurement of metal bioaccessibility in vegetables to improve human exposure assessments: field study of soil-plant-atmosphere transfers in urban areas, South China. *Environmental Geochemistry and Health* 38(6): 1283-1301.
- Zhang, Q.; Yu, R.; Fu, S.; Wu, Z.; Chen, H.Y.H.; Liu, H. 2019. Spatial heterogeneity of heavy metal contamination in soils and plants in Hefei, China. *Scientific Reports* 9(1): 1–8.