

Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno

Effects on ecosystems due to the presence of heavy metals in small-scale mining activity in Puno

Héctor Humberto Novoa Villa^{1*}, Américo Arizaca Avalos², & Fidel Huisa Mamani³

Resumen

La minería de pequeña escala crece cada vez con mayor número de operadores en diferentes partes de mundo. La región Puno, en Perú, no escapa a esta tendencia; colateralmente los impactos negativos en los ecosistemas son cada vez mayores. El objetivo del estudio es determinar la presencia de metales pesados producidos por la actividad minera artesanal en las provincias de Sandía, Carabaya y San Antonio de Putina. Se tomaron siete muestras puntuales de agua próximas a las operaciones de las tres provincias, muestras que fueron evaluadas en un equipo de espectrometría de plasma (ICP); y diez muestras en el centro poblado de La Rinconada analizadas en un equipo Milestone DM 80 exclusivo para análisis de mercurio. En el primer grupo se presentaron aluminio (Al) en rangos de 7,79 hasta 66,2 mg/L; cromo (Cr) con una muestra con 0,12 mg/L; hierro (Fe) con rangos de 36,1 a 280 mg/L; mercurio (Hg) con rangos de 0,0158 a 0,1301 mg/L; manganeso (Mn) variando de 0,4004 a 6,5092 mg/L y níquel (Ni) con valores entre 0,2278 y 1,2148 mg/L. De seis muestras cinco presentan metales que superan los estándares de calidad ambiental para riego y bebida de animales. En La Rinconada, donde operan más de 400 contratistas que conviven con alrededor de 30,000 personas, los análisis arrojaron resultados que varían entre 0,0013 y 0,0188 mg/l para mercurio, superiores a los permisibles de acuerdo con la norma nacional e internacional. Los resultados muestran los efectos negativos para los ecosistemas y la salud de las personas de los entornos.

Palabras clave: Calidad de agua, impacto ambiental, industria minera, mercurio.

Abstract

Small-scale mining is growing with a greater number of operators in different parts of the world, the Puno-Peru region does not escape this reality; collaterally, the negative impacts on ecosystems are increasing, the objective of the study is to determine the presence of heavy metals as a result of artisanal mining activity in the provinces of Sandía, Carabaya and San Antonio de Putina. Seven specific water samples were taken close to the operations of the three provinces, evaluated in a plasma spectrometry equipment (ICP) and 10 samples in the town of Rinconada analyzed in a Milestone DM 80 equipment exclusively for mercury analysis; in the first block, aluminum (Al) was present in ranges from 7.79 to 66.2 mg/L; chromium (Cr) with a sample with 0.12 mg/L; iron (Fe) with ranges from 36.1 to 280 mg/L; mercury (Hg) with ranges from 0.0158 to 0.1301 mg/L; manganese (Mn) varying from 0.4004 to 6.5092 mg/L and nickel (Ni) with values between 0.2278 and 1.2148 mg/L, six samples except one present metals that exceed the environmental quality standards for irrigation and animal drink. In Rinconada, where more than 400 contractors operate, living with around 30,000 people; yielded results that vary between 0.0013 and 0.0188 mg/l for mercury, higher than those allowed according to national and international regulations; the results show the negative effects for the ecosystems and the health of the people of the environments.

Keywords: Environmental impact, mercury, mining industry, water quality.

Recibido: 21/10/2021

Aceptado: 29/07/2022

Publicado: 25/08/2022

Sección: Artículo original

***Autor correspondiente:** hnovoa@unap.edu.pe

Introducción

La minería a pequeña escala se configura como una de las actividades económicas informales más importantes del país y de la región Puno; la zona norte, principalmente las provincias de Sandía, Carabaya y San Antonio de Putina, tiene las provincias de mayor explotación aurífera. La minería de pequeña escala se incrementa cada vez más en diferentes países, pero a pesar de algunas ventajas económicas, su crecimiento colisiona con actividades como la agricultura (Ofosu

et al., 2020). Desde 1990 la producción de oro en este estrato se ha incrementado, así como los ingresos, a pesar

¹Facultad de Ciencias Contables y Administrativas, Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7133-4153>

²Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0424-0138>

³Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6262-9661>

Como citar: Novoa Villa, H. H., Arizaca Ávalos, A., & Huisa Mamani, F. (2022). Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 182–189. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.361>



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share - Adapt

de las medidas restrictivas que se aplicaron; la educación y la capacitación son mecanismos que podrían darle sostenibilidad (Owusu *et al.*, 2019). Los mineros son conscientes de que los conflictos socioambientales están asociados a la formalidad de sus operaciones, pero la obtención del título es la principal barrera para alcanzar estabilidad (Sánchez-Vázquez *et al.*, 2016).

No se puede negar que la minería hace una contribución económica y social en el desarrollo, pero a la vez sus impactos ambientales son significativos (Attiogbe *et al.*, 2020), principalmente en fuentes de agua que elevan sus concentraciones de metales pesados, excediendo los estándares de calidad de los recursos hídricos (Attiogbe & Nkansah, 2017; Siddiqui & Pandey, 2019). Estos impactos ambientales no solo se dan en el agua, también se distribuyen en el suelo próximo a las operaciones de extracción de oro (Niane *et al.*, 2019), donde el principal insumo es el mercurio, que tiene efectos graves sobre la salud de las personas (Budnik & Casteleyn, 2019).

La minería de pequeña escala tiene serios impactos ambientales, por la presencia y liberación de metales pesados, incluido el mercurio que usan los mineros artesanales, que además compromete la salud de los trabajadores: lo cual hace necesario encontrar las fuentes primarias de contaminación por mercurio y otros metales (Saldaña *et al.*, 2022). Los impactos ambientales no solo se producen por metales pesados, a ellos se suma la deforestación, degradación de suelos y la menor disponibilidad de recursos (Ang *et al.*, 2021; Cuya *et al.*, 2021). Uno de los principales desafíos que tiene la minería es el cambio climático que está asociado, que genera reducción de la biodiversidad y erosiona suelos (Marimuthu *et al.*, 2021).

La minería de pequeña escala está catalogada como la fuente más grande de exposición del ser humano al mercurio. El tipo de actividad que desarrolla y los patrones de consumo son condiciones que elevan la concentración de mercurio (Hg); los trabajadores que queman la amalgama reportan una mayor concentración en los estudios de sangre, orina y cabello realizados (Calao *et al.*, 2021). En el caso de peces, la presencia de mercurio total (THg) o el metilmercurio (MeHg) está condicionado al tamaño y el nivel trófico, lo que va a determinar la bioacumulación y el nivel de riesgo para el medio ambiente y para las personas que lo consumen (Salazar *et al.*, 2020). Estudios realizados en Lunar de Oro, Rinconada, presentan concentraciones extremadamente altas de mercurio en todos los puntos de muestreo, además de condiciones ácidas de las aguas que circundan la zona (Loza & Ccancapa, 2020).

La amalgamación es un método para separar el oro de la ganga. Sus residuos se liberan al medio natural como metilato de mercurio inorgánico, que produce envenenamiento extensivo (Davies, 2014). El río Agusan en Filipinas está contaminado por mercurio en más de 14 km, producto de mineras artesanales, con efecto tóxico en la vida acuática (Appleton *et al.*, 1999). La Convención de Minamata referida al uso de mercurio compromete a los gobiernos del mundo a regular la extracción artesanal de oro y la gobernanza ambiental priorizando el uso del territorio (Spiegel, 2016). En Perú, de 70,000 mineros artesanales, 400 mil personas y 40,000 familias, por temor al desempleo el 93% no usan protección personal, y el contacto con el mercurio les produce daño por exposición (Rosales *et al.*, 2013), mientras que el mercurio que ingresa en sedimentos y áreas de depresión, en presencia de arcilla y materia orgánica afecta aun más (Chen *et al.*, 2022).

En la explotación de rocas areniscas se produce enriquecimiento de talio, mercurio, arsénico y antimonio (Tl, Hg, As, Sb), por los procesos de meteorización (Wen *et al.*, 2021). Las emisiones de mercurio llegan a 63t al año en Surinam, y en el mundo se producen entre 380 a 450 toneladas de oro al año; sin embargo, la reducción del uso y el consecuente menor impacto sobre el medio ambiente, son cuestión del conocimiento y la toma de conciencia de las personas, (Moher, 2020; Ottenbros *et al.*, 2019). La minería de oro en Ghana se ha extendido hasta en un tercio de todo el país; las concentraciones de Hg son tres veces mayores al promedio aceptable, producto de la deposición atmosférica durante mucho tiempo, y su efecto es la contaminación de ríos como el Bonsa, que compromete además a la salud de la población (Gyamfi *et al.*, 2021; Obiri *et al.*, 2021; Yevugah *et al.*, 2021).

Materiales y Métodos

Se ha desarrollado un estudio de tipo transversal para evaluar los niveles de concentración de metales pesados como Aluminio, Cromo, Hierro, Mercurio, Manganeso y Níquel en los cuerpos de agua próximos a las operaciones en las minas artesanales. Se determinaron los factores de riesgo por la exposición a las concentraciones de metales pesados en Rinconada, Ananea, Sandía y Carabaya.

Ámbito y población de estudio

El estudio se desarrolló en los centros mineros de Sandía, Carabaya y San Antonio de Putina. Se coordinó y obtuvo permisos de los titulares de las minas de pequeña escala de Rinconada, Ananea, Santa Teresa y Esperanza para obtener muestras de cursos de aguas que circundan

las operaciones y que son fuentes de captación para el procesamiento del mineral. Se obtuvieron inicialmente siete muestras y posteriormente diez muestras para analizar la presencia de mercurio en el Centro Poblado de Rinconada, que está por encima de 5,000 m.s.n.m.

Se consideró puntos de monitoreo a criterio técnico en las zonas donde se realizan actividades mineras a pequeña escala geo referenciado WGS 84 zona 19, como

se muestra en la Tabla 1, y sus análisis en laboratorio acreditado: Laboratorios Analíticos del Sur (LABSUR), laboratorio de ensayo acreditado por la Dirección de Acreditación del INACAL con registro N° LE-050. En las muestras debidamente preservadas y cumpliendo los protocolos se determinó el ensayo aplicado, plasma de acoplamiento inductivo (ICP), que es una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES.

Tabla 1. Puntos de monitoreo de La Rinconada, Ananea, Santa Teresa y Esperanza.

Código	Lugar de muestreo	Coordenadas UTM	Fecha
		Este - Norte	
PM-1	Alto Mirador - A.Sf.	451825-8383759	28/05/2016
PM-2	Consumo (Rinconada) - A.Sf.	S/C	28/05/2016
PM-3	Afluente laguna Lunar de Oro - A.Sf.	451647-8383240	28/05/2016
PM-4	Ananea 1 - A.Sf.	438275-8379173	28/05/2016
PM-5	Puente Isallani - A.Sf.	437946-8377742	28/05/2016
PM-6	Sta Teresa, Dist. Ituata, Prov. Carabaya - A.Sf.	380669-8486855	15/09/2016
PM-7	A.N. Esperanza, Dist. Ayapata, Prov. Carabaya - A.Sf.	380182-8486550	15/09/2016

A.Sf - Aguas superficiales

Por la alta concentración de mineros informales en La Rinconada y el uso de mercurio se realizó una nueva recolección de 10 muestras de agua en enero de 2022. Cada una de ellas se almacenó en frascos de 1000 ml. La distribución de puntos se muestra en la Tabla 2. Las muestras se trasladaron al laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano. Para medir las concentraciones se utilizó un Analizador Directo de Mercurio (DMA) 80evo Milestone - Italia, que tiene un límite de detección de 0,05 ng/g. Las mediciones se repitieron tres veces, para asegurar la calidad de procesamiento de muestras; se utilizó el método de procesamiento del blanco; las desviaciones estándar relativas de los duplicados de las muestras fueron <5% para las concentraciones de mercurio. Los parámetros físico-químicos se determinaron con lecturas directas en campo utilizando el analizador multiparámetro HI 9829-Hanna.

Tabla 2. Puntos de monitoreo de agua en La Rinconada.

PM	Descripción del área	Norte	Este
1	Agua de deshielo	8383752	452347
2	Agua de deshielo	8383758	452340
3	Agua de reciclaje mini planta	8381975	451613
4	Agua en área de desmonte de mina	8381726	451577
5	Agua por filtración	8382168	451118
6	Agua por filtración	8383022	450408
7	Agua de laguna	8382938	448980
8	Agua de consumo humano	8382997	449762
9	Agua por filtración	8382662	449876
10	Aguas residuales de actividad minera informal	8382631	449747

Los puntos de monitoreo que se ubicaron en lugares predeterminados se muestran en la Figura 1.

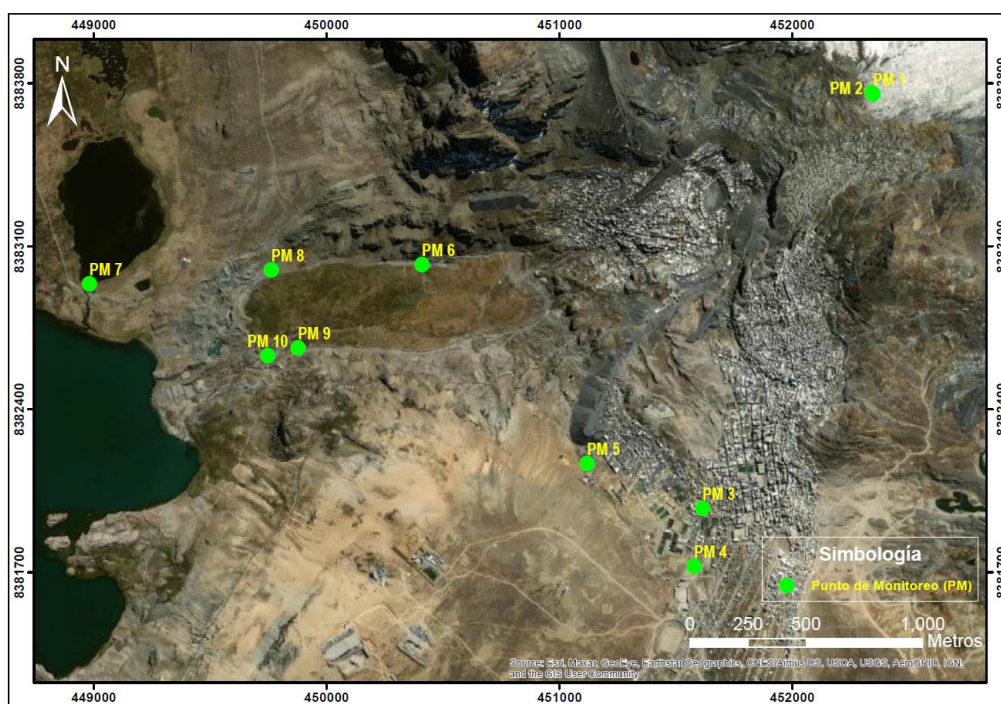


Figura 1. Puntos de monitoreo de aguas superficiales en La Rinconada.

Las estadísticas de los datos se completaron en Microsoft Excel 360, lo que permitió comparar las concentraciones de mercurio con los estándares de calidad ambiental del Ministerio del Ambiente (MINAM).

Resultados

Los resultados de análisis de las muestras de los puntos de monitoreo se muestran en la Tabla 3, y consideran seis metales pesados (Aluminio, Cromo, Hierro, Mercurio, Manganeseo y Níquel), en cuerpos de agua próximos a operaciones mineras de pequeña

escala. Alcanzan niveles de riesgo alarmantes de primer orden, por la presencia de mercurio (Hg), seguido de manganeso (Mn), níquel (Ni), aluminio (Al), hierro (Fe) y cromo (Cr), respectivamente. En el caso del Aluminio, se tiene resultados exageradamente altos en los puntos que corresponden a la mina La Rinconada, con valores entre 50,2 y 66,2 mg/L, que supera los estándares de calidad ambiental (ECA,2017) en la categoría de riego de vegetales (RV) y bebida de animales (BA) cuya norma establece un máximo del 5 mg/L, con implicancias de la presencia de aluminio, teniendo en cuenta que estas fuentes de agua se usan también para consumo humano.

Tabla 3. Elementos cuyas concentraciones sobrepasan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) – Agua Superficial de La Rinconada, Ananea, Santa Teresa y Esperanza.

Parámetro	Unid.	ECA ⁽³⁾ –		Puntos de monitoreo						
		RV	BA	PM-1	PM-2	PM-3	PM-4	PM-5	PM-6	PM-7
Aluminio (Al)	mg/L	5	5	7,79*	0,252	50,2*	66,2*	0,043	4,98	54,8*
Cromo (Cr)	mg/L	0.1	1	a<0,00039	a<0,00039	0,06788	0,05956	a<0,00039	0,11657*	0,08878
Hierro (Fe)	mg/L	1	1	0,149	a<0,016	202*	118*	0,089	36,1*	280*
Mercurio (Hg)	mg/L	0.001	0.001	a<0,00041	0,00269*	0,13031*	0,00279*	a<0,00041	0,01557*	0,25164*
Manganeseo (Mn)	mg/L	0.2	0.2	2,8744*	0,05236	6,5092*	5,5814*	0,00291	0,40041*	4,0920*
Níquel (Ni)	mg/L	0.2	0.2	0,48031*	0,02344	1,2148*	0,22779*	a<0,00051	0,02181	0,58093*

(3) DS N° 004-2017-MINAM. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.

Categoría 2: Población y Recreacional.

RV: Aguas para Riego de Vegetales

BA: Aguas para Bebida de Animales

a< Valor numérico = Limite de detección del método

(*) Parámetros que sobrepasan los ECA agua

En el caso del cromo en el punto PM-6 que corresponde al distrito de Ituata, cerca de varias pequeñas minas en la zona de Santa Teresa se presentaron resultados por encima de lo permisible. Si bien los valores de 0,11657 son ligeramente superiores, el consumo de agua

es de la misma fuente que se utiliza para el procesamiento del oro, lo que supone que existe cierto riesgo para las personas expuestas, y procesos de degradación del medio ambiente.

Los valores de hierro por encima de lo permisible se hallaron en áreas de actividad minera de pequeña escala, tanto en Ananea como en Rinconada, al igual que en Santa Teresa, en Ituata y en Esperanza en Ayapata, con valores de 202, 118, 36,1 y 280 mg/L que están muy por encima de lo permisible establecido por la entidad competente, que es de 1 mg/L. Esta situación nos alerta del alto riesgo de las poblaciones y los ecosistemas, por la exposición y difícil degradación de los metales pesados.

Las concentraciones de mercurio producto del monitoreo se identificaron en las tres zonas de minería informal con valores de 0,00269, 0,13031, 0,00279 0,01557 y 0,25164 mg/L en punto de consumo humano, Laguna Lunar de Oro, Santa Teresa y Esperanza respectivamente. Aquí se destaca que el agua de consumo humano en Rinconada tiene valores de 0,0029 mg/L, con alto riesgo para quienes la consumen. La exposición a manganeso (Mn) y níquel (Ni) directamente vinculada a las actividades mineras en la explotación del oro igualmente provocaría efectos irreversibles en la salud de los trabajadores, en los suelos y las fuentes de agua.

La liberación de mercurio y otros metales pesados en las actividades mineras de pequeña escala nos demuestra que existe una fuerte contaminación, debido a la ausencia de tecnologías adecuadas para la recuperación del oro, la falta de servicios médicos preventivos y, lo más importante, un proceso de formalización que implique el cumplimiento de la norma ambiental.

Los resultados del monitoreo de aguas y sus parámetros físicos en el Centro Poblado de la Rinconada se muestran en la Tabla 4, en la cual los niveles de pH varían entre 4,08 y 4,77 en aguas ácidas que serían la principal fuente de presencia de metales pesados, incluido el mercurio producto de la amalgamación que se utiliza para la obtención del oro. Los parámetros de oxígeno disuelto que están por debajo de 5 mg/L ponen en riesgo la vida vegetal y animal en cuerpos de agua. Estos valores, que fluctúan entre 4,35 y 4,8 mg/L, se encuentran por debajo de la norma. Los valores de la conductividad hidráulica fluctúan entre 9 y 683 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cuando la norma establece que este valor debe estar por encima de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para aguas de riego. Esto implicaría que los efluentes no sirven para los cultivos de plantas, tal como lo establece la normativa de los ECA (ANA, 2011).

Tabla 4. Parámetros físico químicos para agua obtenidos en la mina Rinconada.

PM	Conductividad Eléctrica	pH	Oxígeno disuelto	Sólidos disueltos	Temperatura	%DO
1	13	4,5	4,19	6	0,00	48,5
2	9	4,35	4,63	5	0,04	53,8
3	145	4,44	1,48	72	12,71	24,1
4	40	4,43	3,29	20	9,02	48,7
5	108	4,8	3,63	54	8,55	52,9
6	372	4,72	3,33	186	7,14	47,3
7	791	4,77	2,18	398	12,29	44,5
8	409	4,72	2,41	206	10,89	45,7
9	108	4,69	1,41	54	7,76	20,3
10	683	4,74	2,83	342	9,65	43,2

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Oxígeno disuelto (mg/L)
Sólidos disueltos (mg/L)
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Cuatro de las diez muestras tomadas en el CP La Rinconada superan los límites máximos permisibles para mercurio, en la acumulación de agua de deshielo, en la miniplanta que utiliza agua para reciclaje y en los efluentes de aguas residuales de actividad minera informal.

Tabla 5. Concentración de mercurio en muestras de agua del centro poblado de La Rinconada.

PM	Descripción del área	Hg
1	Agua de deshielo	0.0015
2	Agua de deshielo	0.0013
3	Agua de reciclaje mini planta	0.002
4	Agua en área de desmonte de mina	0.0006
5	Agua por filtración	0.0005
6	Agua por filtración	0.0005
7	Agua de laguna	0.0005
8	Agua de consumo humano	0.0005
9	Agua por filtración	0.0004
10	Aguas residuales de actividad minera informal	0.0188

La Figura 3 y la Tabla 1 nos muestra que de las diez muestras obtenidas y procesadas en el DMA 80evo Milestone exclusivo para mercurio de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNA Puno, cuatro superaron los niveles permisibles establecidas por el MINAM cuyos valores están entre 0,015 y 0,0188 mg/L. Permiten ver las variaciones de los impactos y los efectos colaterales de la presencia de mercurio en la zona, que pueden ocurrir con los valores encontrados en los efluentes que pasan a la cuenca del río Ramis, como producto de los procesos de amalgamación y refogado de oro que se realiza, y que se convierten en una fuente de exposición y alto riesgo (Calao *et al.*, 2021; Salazar *et al.*, 2020).

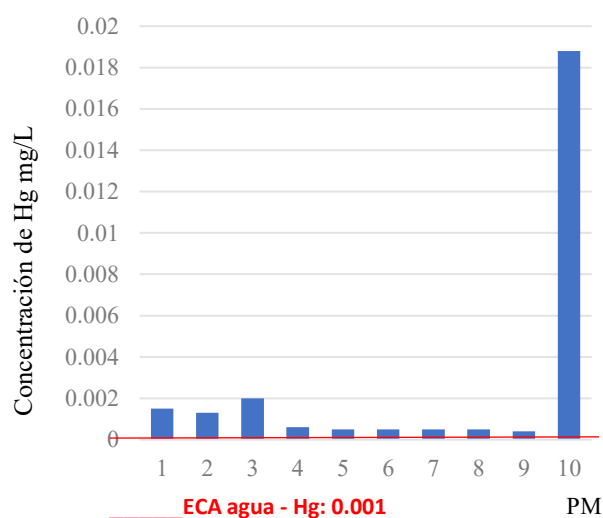


Figura 2. Mercurio total en efluentes minero-metalúrgicos CP La Rinconada.

Discusión

Los resultados obtenidos son similares en los niveles de pH encontrados en estudios de Lunar de Oro, que es un sector de la mina Rinconada, cuyos valores fluctúan en pH de 3,47. Lo mismo sucede con el oxígeno disuelto que está en el orden de 3,28 mg/L, mientras que la conductividad eléctrica si se halla mucho más elevada, en el orden de 1,300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Loza & Ccancapa, 2020). Existe gran incremento de la minería de pequeña escala en el Perú y en el mundo que está comprometiendo los ecosistemas y contaminando ríos y suelos que se dedican a actividades como la agropecuaria, a pesar de los beneficios económicos y la generación de empleo no formal que se genera (Ofosu *et al.*, 2020). Esta actividad puede ser sostenible a medida que se resuelvan los aspectos concernientes, siendo el aspecto medioambiental el punto crítico a tener en cuenta; es un aspecto de educación que pasa por la capacitación de los involucrados (Owusu *et al.*, 2019).

La presencia de metales pesados y de mercurio como consecuencia del drenaje ácido y del proceso de

amalgamación es un aspecto que genera muchos riesgos en el ambiente y en la salud de las personas, por hallarse fuera de los estándares que establece la norma (Attiogbe & Nkansah, 2017). Mostramos que existen grandes cantidades de mercurio que se vierte a la atmósfera, a los suelos y cuerpos de agua por parte de la minería a pequeña escala que se utiliza en la amalgamación (Calao *et al.*, 2021). El hecho de tener más de 70,000 mineros informales en 23 regiones del país y un promedio de 5,000 operadores mineros en la región Puno que a su vez generan otros puestos de trabajo directo e indirecto, explica, como lo señalan Attiogbe *et al.* (2020), que la minería tiene un rol importante económico y social.

Conclusiones

El estudio permitió evaluar el nivel de impacto por metales pesados producto de la actividad minera artesanal que se desarrolla en la región Puno. La presencia de aluminio (Al) de 07 muestras 04 está en rangos de 7,79 hasta 66,2 mg/L; en cromo (Cr) se tiene una muestra con 0,12 mg/L; en hierro (Fe) cuatro muestras con rangos de 36,1 a 280 mg/L; mercurio (Hg) con cinco muestras que varían entre 0,0158 a 0,1301 mg/L; manganeso (Mn) cinco muestras en rangos de 0,4004 a 6,5092 mg/L; y níquel (Ni) cuatro muestras que varían entre 0,2278 y 1,2148 mg/L. Todos estos rangos superan los estándares de calidad ambiental de agua tanto para riego de vegetales como bebida de animales. En el caso de la mina La Rinconada que es el más grande centro minero de la región de Puno, pues alberga a más de 30,000 personas vinculadas a la extracción de oro en la cabecera de la cuenca del río Ramis, en cuatro de diez muestras de agua se halló mercurio mayor al 0,001 mg/L que establece la autoridad competente.

La presencia de mercurio y metales pesados como aluminio, cromo, hierro, manganeso y níquel, en varios casos muy superior a los establecidos, podría estar comprometiendo la principal cabecera de cuenca del río Ramis. Se debe tener en cuenta que existe un punto de acumulación de efluentes que tiene un valor de 0,0188 mg/L de mercurio, extremadamente alto, que pone en riesgo a las lagunas que se encuentran próximas, aguas abajo.

Agradecimiento

Agradecemos a la Universidad Nacional del Altiplano y al Vicerrectorado de Investigación por promover la investigación y el financiamiento de la investigación sobre las condiciones laborales y medio ambientales de los trabajadores artesanales de la región Puno.

Referencias

- ANA. (2011). Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad en Cuerpos Naturales de Agua Superficial. Autoridad Nacional del Agua [en línea]. <https://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-no-182-2011-ana-013/10/2014>.
- Ang, M. L. E., Arts, D., Crawford, D., Labatos Jr, B. V., Ngo, K. D., Owen, J. R., . . . Lechner, A. M. (2021). Socio-environmental land cover time-series analysis of mining landscapes using Google Earth Engine and web-based mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100458. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100458>
- Appleton, J. D., Williams, T. M., Breward, N., Apostol, A., Miguel, J., & Miranda, C. (1999). Mercury contamination associated with artisanal gold mining on the island of Mindanao, the Philippines. *Science of The Total Environment*, 228(2-3), 95-109. [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00016-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00016-9)
- Attigbo, F., & Nkansah, A. (2017). The impact of mining on the water resources in Ghana: Newmont case study at Birim north district (new abirem). *Energy Environ. Res*, 7(2), 27-36. DOI: 10.5539/eer.v7n2p27
- Attigbo, F. K., Mohammed, A. R., & Kingslove, Q. (2020). Assessing the potential health impact of selected heavy metals that pollute lake amponsah in Bibiani, Western North region, Ghana. *Scientific African*, 9, e00531. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00531>
- Budnik, L. T., & Casteleyn, L. (2019). Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences. *Science of The Total Environment*, 654, 720-734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.408>
- Calao, R. C., Bravo, A. G., Paternina, U. R., Marrugo, N. J., & Díez, S. (2021). Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environment International*, 146, 106216. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106216>
- Chen, X., Zheng, L., Sun, R., Liu, S., Li, C., Chen, Y., & Xu, Y. (2022). Mercury in sediment reflecting the intensive coal mining activities: Evidence from stable mercury isotopes and Bayesian mixing model analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 113392. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113392>
- Cuya, A., Glikman, J. A., Groenendijk, J., Macdonald, D. W., Swaisgood, R. R., & Barocas, A. (2021). Socio-environmental perceptions and barriers to conservation engagement among artisanal small-scale gold mining communities in Southeastern Peru. *Global Ecology and Conservation*, 31, e01816. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01816>
- Davies, G. R. (2014). A toxic free future: Is there a role for alternatives to mercury in small-scale gold mining? *Futures*, 62, Part A, 113-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2013.11.004>
- Gyamfi, O., Sørensen, P. B., Darko, G., Ansah, E., Vorkamp, K., & Bak, J. L. (2021). Contamination, exposure and risk assessment of mercury in the soils of an artisanal gold mining community in Ghana. *Chemosphere*, 267, 128910. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128910>
- Loza, d. C. A. L., & Ccancapa, S. Y. (2020). Mercurio en un arroyo altoandino con alto impacto por minería aurífera artesanal (La Rinconada, Puno, Perú). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(1), 33-44. <https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.53317>
- Marimuthu, R., Sankaranarayanan, B., Ali, S. M., Jabbour, A. B. L. d. S., & Karupiah, K. (2021). Assessment of key socio-economic and environmental challenges in the mining industry: Implications for resource policies in emerging economies. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 814-830. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.005>
- Moher, P. (2020). Health and Artisanal Gold Mining, Human and Ecosystem Health. <https://www.artisanalgold.org/publications/articles/health-and-artisanal-gold-mining/Artisanal>
- Niane, B., Guédron, S., Feder, F., Legros, S., Ngom, P. M., & Moritz, R. (2019). Impact of recent artisanal small-scale gold mining in Senegal: Mercury and methylmercury contamination of terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 669, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.108>
- Obiri, Y. A., Nyantakyi, E. K., Mohammed, A. R., Yeboah, S. I. I. K., Domfeh, M. K., & Abokyi, E. (2021). Assessing potential health effect of lead and mercury and the impact of illegal mining activities in the Bonsa river, Tarkwa Nsuaem, Ghana. *Scientific African*, 13, e00876. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00876>

- Ofosu, G., Dittmann, A., Sarpong, D., & Botchie, D. (2020). Socio-economic and environmental implications of Artisanal and Small-scale Mining (ASM) on agriculture and livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 106, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.005>
- Ossenbros, I. B., Boerleider, R. Z., Jubitana, B., Roeleveld, N., & Scheepers, P. T. J. (2019). Knowledge and awareness of health effects related to the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in Suriname. *Environment International*, 122, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.059>
- Owusu, O., Bansah, K. J., & Mensah, A. K. (2019). "Small in size, but big in impact": Socio-environmental reforms for sustainable artisanal and small-scale mining. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.02.001>
- Rosales, R. J. A., Malca, E. N., Alarcón, J. J., Chávez, M., & Gonzáles, M. A. (2013). Daño genotóxico en trabajadores de minería artesanal expuestos al mercurio. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 30, 595-600. http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342013000400009&nrm=iso
- Salazar, C. C., Salas, M. M., Paternina, U. R., Marrugo, N. J., & Díez, S. (2020). Dataset of concentrations of mercury and methylmercury in fish from a tropical river impacted by gold mining in the Colombian Pacific. *Data in Brief*, 33, 106513. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106513>
- Saldaña, V. K., Pérez, V. F. J., Ávila, G. I. P., Méndez, R. K. B., Carrizalez, Y. L., Gavilán, G. A., . . . Diaz, B. F. (2022). A preliminary study on health impacts of Mexican mercury mining workers in a context of precarious employment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 71, 126925. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.126925>
- Sánchez-Vázquez, L., Espinosa-Quezada, M. G., & Eguiguren-Riofrío, M. B. (2016). "Golden reality" or the "reality of gold": Artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador. *The Extractive Industries and Society*, 3(1), 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.11.004>
- 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>
- Spiegel, S. (2016). Land and 'space' for regulating artisanal mining in Cambodia: Visualizing an environmental governance conundrum in contested territory. *Land Use Policy*, 54, 559-573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.015>
- Wen, J., Wu, Y., Li, X., Lu, Q., Luo, Y., Duan, Z., & Li, C. (2021). Migration characteristics of heavy metals in the weathering process of exposed argillaceous sandstone in a mercury-thallium mining area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111751>
- Yevugah, L. L., Darko, G., & Bak, J. (2021). Does mercury emission from small-scale gold mining cause widespread soil pollution in Ghana? *Environmental Pollution*, 284, 116945. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116945>