

**Impacto de la Minería en Aguas Superficiales
de la Región Puno – Perú**

**Impact of Mining on Surface Waters
of the Region Puno – Perú**

Magaly Alejandra Brousett-Minaya¹
mbrousett@unsa.edu.pe

Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa-Perú

Gerby Giovanna Rondan-Sanabria²
C16238@utp.edu.pe

Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa- Perú

Maritza Chirinos-Marroquín³
mchirinos@ulasalle.edu.pe

Universidad La Salle, Arequipa- Perú

Ivan Biamont-Rojas⁴
biamont.ivan@gmail.com

Universidad Estadual de Sao Paulo -UNESP, Sao Paulo-Brazil

.....

Agradecimiento: Biamont-Rojas es becario del Programa de Estudiantes de Postgrado - PEC-PG de CAPES / CNPq, Brasil

1 Químico, Magister en Biología Funcional y Molecular, Doctorado en Ciencias Tecnológicas Medioambientales. Número de ORCID 0000-0002-3343-402X.

2 Químico, Magister Doctor y Pos doctor en Ciencias de los Alimentos – Área de Bromatología. Número de ORCID 0000-0002-8284-7269.

3 Ingeniero Industrial. Magister en Ciencias. MBA en Gestión y Tecnologías Ambientales. Número ORCID 0000-0002-1867-4412.

4 Biólogo, Magister en Ciencias de la Ingeniería Agrícola. Número de ORCID 0000-0002-6799-835X.

Resumen

El objetivo del presente estudio es evaluar las condiciones físicas y químicas de las aguas superficiales derivadas de los deshielos del nevado Riticucho en la Rinconada- Puno, los cuales evidentemente son afectados por la actividad minera informal desarrollada en esa localidad. El trabajo evalúa el efecto de esta actividad en sedimentos y agua de las lagunas Lunar y Cumunni, las cuales fueron evaluadas en temporada seca y temporada de lluvias en 2018. El análisis físico-químico incluyó: pH, conductividad, OD, DBO₅, DQO, dureza, cloruros y sólidos en suspensión. También incluyó metales (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb y Zn) en agua y sedimentos. El diseño de investigación es descriptiva, ya que se describen y analizan los datos encontrados, observándolos sin influenciar en ninguna variable del estudio. La metodología desarrollada fue la propuesta en los Métodos Estandarizados para el Agua: APHA, AWWA 2012, que incluye técnicas nefelométricas, fotométricas y colorimétricas. Los resultados fueron comparados con normas de calidad ambiental peruanas, canadienses y niveles de referencia para los Estados Unidos de América. Los resultados muestran valores fuera de las normas establecidas, principalmente el pH ácido y aguas duras. Los metales Cd, Ni, Pb, Fe y Zn también exceden los límites de los estándares. La concentración de Hg en sedimentos alcanzó valores altos de 20,13 y 33,32 mg/Kg en época de lluvias y seca respectivamente.

Palabras Clave:

Contaminación, lagunas, minería, mercurio, sedimentos.

Abstract

This work evaluates the effect of mining activity on sediments and water from the Lunar and Cumunni lagoons, in Puno. Surface waters were evaluated in the dry season and rainy season in 2018. The physical-chemical analysis included: pH, conductivity, DO, BOD₅, COD, hardness, chlorides and suspended solids. It also included metals (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb and Zn) in water and sediments. The results were compared with Peruvian and Canadian environmental quality standards and reference levels for the United States of America. The results show values outside the established norms, mainly acid pH and hard water. The metals Cd, Ni, Pb, Fe and Zn also exceed the limits of the standards. The concentration of Hg in sediments reached high values of 20.13 and 33.32 mg / Kg in the rainy and dry season respectively.

Key words:

Pollution, lagoons, mining, mercury, sediments.



Introducción

Una de las actividades económicas más comunes y lucrativas en Perú es la minería, que representa una parte significativa de la inversión, las exportaciones, los ingresos fiscales y el empleo del país. Hay ocho minerales que constituyen los principales productos básicos mineros exportados entre el 2011 y 2015, que son oro, plata, cobre, zinc, plomo, estaño, hierro y molibdeno (Osignermin, 2016). Sin embargo, esta actividad también ha traído consigo un aumento de conflictos sociales por inconformidades o contradicciones entre los grupos de interés, además de ellos la problemática de las mineras informales.

En la década de los 80 en Puno, los habitantes de la provincia de San Antonio de Putina establecieron en la localidad de Rinconada un centro minero informal de extracción de oro (Goyzueta y Trigos 2009). Esta práctica informal viene cobrando impulso desde el año 2000, generando serios problemas en el ámbito ambiental y de salud pública, dado que familias enteras se dedican a la minería informal sin medidas de protección, generando al mismo tiempo residuos de relaves que llegan a las fuentes de agua sin tratamiento previo. Estas prácticas son las explicadas por Wen-Cheng, Hwa-Lung y Chung-En (2011) y Talledos (2017) quienes concluyen que el cambio climático y el estrés hídrico, están limitando la disponibilidad de agua limpia en todo el mundo. Sin embargo, las contribuciones antropogénicas de una variedad de fuentes tienden a ser los principales factores que afectan a la mayoría de los cuerpos de agua.

Por otro lado, las variaciones en la calidad de las aguas continentales son el resultado de una combinación de procesos naturales, como la meteorización y la erosión del suelo, y contribuciones antropogénicas, como la descarga de residuos municipales e industriales. Este último, constituye una fuente

constante de contaminación, que afecta en gran medida a la flora y fauna acuática. Un ejemplo de esto es el impacto de la minería en ríos y lagos. La exposición de metales pesados a fuentes acuíferas constituye un grave problema ambiental por la toxicidad de estos metales y sus repercusiones fisiológicas, tanto en humanos como en animales (Londoño-Franco, Londoño-Muñoz y Muñoz-García, 2016; Molina, Ibañez y Gibon, 2013). Los metales pesados son constituyentes importantes de las aguas residuales industriales, aunque solo están presentes en trazas. Cualquier ion con peso atómico superior a 23 se considera metal pesado. Los ejemplos incluyen níquel, magnesio, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio, entre otros. La determinación de las concentraciones de metales pesados generados por la actividad humana permite evaluar el nivel al que se ve afectada una determinada zona. Para ello, es indispensable analizar no solo el agua, sino también los sedimentos, ya que los metales tienden a depositarse en el piso del cuerpo de agua afectado (Soto-Cruz, Carrillo-Chávez y Suárez-Sánchez, 2011).

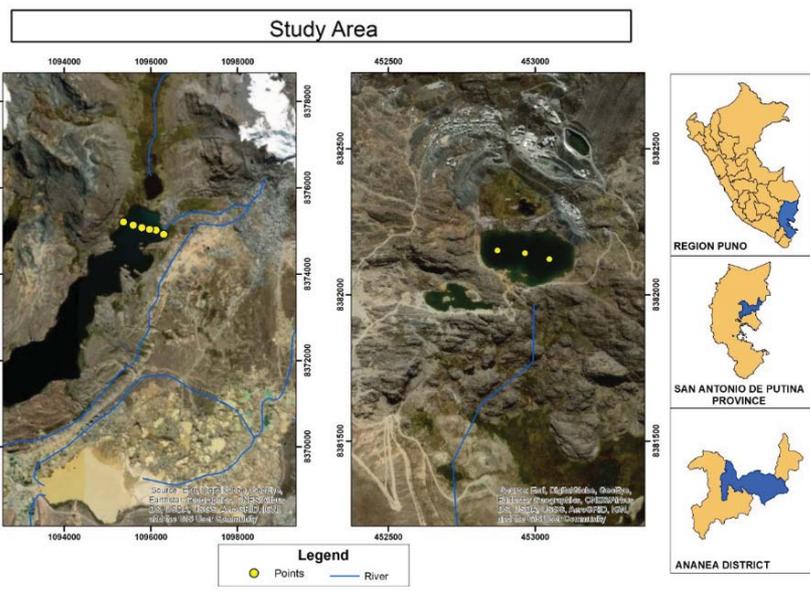
Debido a su alta toxicidad, As, Cr, Hg, Ni, Cu y Cd se consideran parte de una clase de metales peligrosos. Estas sustancias han sido estudiadas en diferentes aguas de riego de cultivo, mostrando su presencia en diferentes productos de plantación, poniendo en riesgo la salud alimentaria de la población (Fransisca, et al., 2015; Li, et al., 2015). Las aguas de la Laguna Lunar en la Rinconada recorren hasta el río Crucero, luego por los ríos Azángaro y Ramis, para finalmente desembocar en el lago Titicaca. En esta ruta, las aguas se utilizan para el riego y consumo de animales, así como para actividades domésticas. Debido a la situación expuesta, el objetivo de la presente investigación es analizar parámetros físico-químicos, considerando la presencia de metales pesados en aguas y sedimentos de estas dos fuentes de agua superficial, con el fin de demostrar el grado de contaminación derivado de la explotación minera.

Material y métodos

La Rinconada se ubica a 5 400 metros sobre el nivel del mar en la zona norte de la región de Puno, en la provincia de San Antonio de Putina,

distrito de Ananea. Las lagunas conocidas como “Lunar” y “Cumunni” tienen su origen en el Glaciar Riticuho (Fig. 1), las cuales son usadas en diferentes actividades domésticas.

Figura 1: Ubicación del estudio



Metodología

Se realizó una evaluación in-situ con el objetivo de determinar las condiciones higiénicas y organolépticas de las lagunas, así como posibles factores de contaminación. Las muestras de agua se tomaron en temporada de estiaje y de lluvia con la finalidad de comparación. El muestreo se realizó de acuerdo con el “protocolo de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos” establecido por la Autoridad Nacional del Agua - DGCRH (2010), y siguiendo el apartado 6.4 de la metodología de muestreo para aguas superficiales. Estas fueron tomadas entre las 12 y 14 horas a 20cm de profundidad. Los puntos de muestreo se visualizan en la figura 1: tres puntos diferentes a lo largo del cuerpo de agua de la laguna Cumunni

y seis puntos en la laguna Lunar. Las muestras fueron trasladadas para la determinación de parámetros físico-químicos (Tabla I) y siguiendo la metodología propuesta en los Métodos Estandarizados para el Agua: APHA, AWWA 2012, que incluye técnicas nefelométricas, fotométricas y colorimétricas. Para la determinación de la dureza y cloruros se determinó por método volumétrico. Para la medición de pH y conductividad se realizó por método electrométrico. La demanda química de oxígeno se determinó por método colorimétrico requiriendo un espectrofotómetro, así como DBO₅ medida por el método Winkler. Las determinaciones para sólidos disueltos y suspendidos fueron realizados por métodos gravimétricos.

Utilizando un muestreador tipo draga, se realizó el muestreo de sedimentos (800 mg) en los mismos puntos del muestreo de agua. Las muestras se colocaron en bolsas de polietileno previamente lavadas con ácido nítrico al 10% y posteriormente en el laboratorio fueron secadas a 40°C y transportadas para análisis. Las muestras para el análisis de metales en agua se tomaron en frascos de polietileno de 250 mL, conteniendo 1 ml de HNO₃ 1: 1 hasta pH <2.0 para su conservación. Las muestras de sedimentos y agua fueron enviadas al laboratorio de ALS CORPLAB (Corporación de Laboratorios Ambientales del Perú S.A.C., acreditado por INACAL DA-Perú, Registro N ° LE-029). Todas las muestras fueron conservadas y transportadas a una temperatura de 4°C. Los análisis, a excepción del de mercurio, se realizaron mediante espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (EPA METHOD 200.7 Rev. 4.4 1994). El mercurio se analizó mediante espectroscopía de absorción atómica de vapor frío (MÉTODO EPA 245.1 Rev. 3.0 1994).

Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de componentes principales (PCA), basado en Legendre y Legendre (1998). Esta prueba permitió la evaluación de ambas lagunas (Cumunni y Lunar) en cada estación (estiaje y lluviosa). Los autores realizaron la prueba juntando las épocas de lluvia y estiaje de las lagunas correspondientes, buscando parámetros que influyeran en la calidad del agua y la sostenibilidad ecológica entre y dentro de los cuerpos de agua. Los datos originales fueron estandarizados inicialmente por $\log_{10}(x + 1)$, donde “x” era el valor del parámetro inicial.

Estos nuevos datos se analizaron con el software PAST v3.0.

Los resultados fisicoquímicos de las aguas se compararon con los Estándares de Calidad Ambiental del Perú N° 015-2015-MINAM en Categoría 4: E-1 sobre parámetros establecidos para lagos y lagunas (EQS). Los resultados de metales se compararon con las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (CEQG), que establecen parámetros de calidad del agua para la protección de la vida acuática en referencia a la presencia de metales en aguas continentales. Los resultados de sedimentos con las regulaciones internacionales de Canadá (ISQG) y con el Nivel de efecto probable (PEL), que es la concentración por encima de la cual aparecer efectos biológicos adversos. Los resultados de los metales en sedimentos se compararon con los niveles de fondo establecidos en la tabla de referencia (Tabla de referencia rápida de detección de sustancias inorgánicas en sedimentos de agua dulce) publicada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos.

Resultados y discusión

En la Laguna Cumunni, no se observaron efluentes significativos. Sin embargo, se evidenció contaminación por actividades domésticas como el lavado de prendas y el vertido de residuos sólidos. En Laguna Lunar se evidenciaron importantes efluentes, que transportaban relaves de minería, material orgánico y desechos sólidos principalmente plásticos.

TABLA I. Parámetros fisicoquímicos en época de lluvia y estiaje en lagunas Cumunni y Lunar

Parámetros	Época estiaje 17°C.		Época lluviosa 10°C.		
	Cumunni	Lunar	Cumunni	Lunar	EQS 4:E-1 LMP
pH	4.61 ± 0.37	3.03±0.13	4.54±0.23	2.14± 0.08	6.5 -9.0
Conductividad 25°C. (uS/cm)	655 ±18.86	922.15± 13.82	1063.99 ±130.49	1448.63 ±101.14	1000
Solidos disueltos	1.10±0.20	3.61± 0.45	3.48±0.94	87.36 ±1.27	-

Solidos suspendidos	0.84 ±0.11	0.87± 0.07	1.16±0.08	36.5 ±1.13	< 25mg/l
DQO	25.65 ±2.10	7.95 ±1.0	28.08±0.96	10.71±1.0	-
DBO ₅	9.16±1.30	<2	10.51±0.44	<2	5 mg/l
OD	0.27±0.03	0.18 ±0.01	2.44± 0.14	1.02±0.13	> 5 mg/l
Dureza	231.53 ±9.10	339.67 ±44.66	321.27± 18.36	469.09±16.03	-
Cloruros	51.5 ±7.27	24.75 ±1.79	62.61±3.0	46.44±1.62	-

Fuente: Elaboración propia

El pH de ambas lagunas (Tabla I) se encontró fuera de los parámetros establecidos por los estándares de EQS. Se encontró que la laguna lunar es la más ácida, con valores de 3.03 ± 0.13 y 2.14 ± 0.08 durante las épocas de estiaje y lluvia, respectivamente. Estos resultados podrían explicarse por la presencia de altas concentraciones de hierro, derivado de efluentes que transportan relaves mineros, que se encuentran en el agua y en los sedimentos de la laguna (Tablas IV y V). Este metal se puede encontrar en las lagunas como sulfuro de hierro, más generalmente conocido como piritita (FeS_2), que es el mineral cuya oxidación se considera la principal fuente de generación de ácido.

Durante la época de lluvia, el índice de acidez es mayor, debido al drenaje ácido que existe en la zona, y las concentraciones más altas de PTEs disueltos (elementos potencialmente tóxicos como PbS, ZnS, CuFeS_2 y FeAsS) (Moncur, Ptacek, Blowes y Jambor, 2004). Estos sulfuros metálicos fluyen libremente, transportados por corrientes fluviales hacia el cuerpo de agua, aumentando así su acidez, fenómeno registrado no solo en aguas superficiales, sino también en aguas subterráneas y suelos. En cuanto a la dureza, el agua de ambas lagunas se clasificó como dura y muy dura. La Laguna Cumunni durante la época de estiaje mostró el valor más bajo de dureza (231.53 ± 9.10 mg/L), mientras que la Lunar durante la temporada de lluvias tuvo la mayor dureza (469.09 ± 16.03 mg/L). La dureza se correlacionó positivamente con su conductividad. Durante la época de estiaje, la Laguna Cumunni presentó un valor de conductividad de $655,57 \pm 18,86$ uS/cm, mientras que la Lunar presentó un valor de $1448,63 \pm$

101,14 uS/cm durante la época lluviosa. La conductividad de las aguas de la Laguna Lunar excede el LMP de Categoría 4: E-1. Estos valores indican la presencia de minerales solubles en un medio ácido, los cuales pueden ser carbonatos u oxihidróxidos ferrosos.

El oxígeno disuelto de ambas lagunas está lejos de cumplir con las normas. Los valores mínimos registrados se midieron en Laguna Lunar, con valores de $0,18 \pm 0,01$ mg/L y $1,02 \pm 0,13$ mg/L en la época de estiaje y de lluvia, respectivamente. Si bien el oxígeno gaseoso se disuelve mejor a bajas temperaturas (Sierra, 2016; Baque-Mite, et al., 2016,) y dado que Rinconada es una localidad que experimenta temperaturas bajo cero durante el invierno, los factores predominantes que contribuyen a la ausencia de oxígeno serían su utilización en la oxidación de amoníaco y amonio, sustancias derivadas de la materia orgánica existente, proveniente de aguas residuales de la minera, y residuos derivados de centros urbanos que se dirigen a la laguna Lunar a través de canales. La Laguna Cumunni presenta mayores valores de oxígeno disuelto, posiblemente debido a la presencia, aunque en pequeñas cantidades, de material vegetal que libera oxígeno durante el proceso de fotosíntesis, algo que no se observó en Laguna Lunar. Si bien existe un leve aumento de oxígeno en ambas lagunas durante la temporada de lluvias, quizás debido a la exposición natural del aire que provoca más movimiento en las corrientes en este momento, esta variabilidad no sería suficiente para permitir una vida acuática duradera en ambas lagunas.

Los valores encontrados en la DBO_5 de la laguna Cumunni oscila entre 9.16 ± 1.30 y 10.51 ± 0.44 mg/L, ambos exceden la categoría 4: E-1, indicando la presencia de una masa significativa de material orgánico (Bellos y Sawidis, 2005). En el caso de la laguna Lunar, esta se encuentra en procesos oligotróficos, sin organismos vivos, debido a que la laguna tiene altos valores de DQO y bajos valores de pH, muy pocas especies de bacterias o algas (macroscópicas y microscópicas) especializadas en la descomposición de materia orgánica son capaces de sobrevivir dentro de este ecosistema. Es por esta razón que la DBO_5 , así como la concentración de oxígeno disuelto, es tan baja; no hay un reabastecimiento biológico

continuo, solo físico durante la estación lluviosa, que es temporal. En cuanto a sólidos disueltos y suspendidos, la laguna Lunar presentó los valores más altos durante la época lluviosa, con $87,36 \pm 1,27$. Este valor difiere de Cumunni (3.48 ± 0.94) debido a la descarga de material orgánico y relaves mineros en la laguna Lunar, lo cual no se evidencia en el otro cuerpo de agua.

Resultados estadísticos de los parámetros fisicoquímicos

Los resultados del PCA al describir ambas lagunas en la misma temporada (Tabla II) mostraron que el primer y segundo componentes principales contribuyen en gran medida a la descripción de los resultados en las dos temporadas. La época de estiaje en el primer componente principal (PC1) está fuertemente correlacionada con la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos disueltos, que a su vez están relacionados con la descomposición de materia orgánica e inorgánica; sin embargo, el segundo componente principal (PC2) está relacionado con la DQO, la dureza y los cloruros, lo que explica el aumento de las concentraciones de las sales debido a fuentes artificiales. Se reconoce que los valores de Laguna Lunar están relacionados con la conductividad, sólidos en suspensión y disueltos debido a las descargas no solo del excedente químico de la minería, sino también de las aguas residuales que llegan sin tratamiento adecuado; mientras que los valores de la Laguna Cumunni están altamente asociados con la DBO, el OD indica una mejor relación con la biota que descompone la materia orgánica en este cuerpo de agua debido al consumo de oxígeno.

La temporada de lluvias en el PC1 se correlaciona con los sólidos disueltos y en suspensión, lo que explica la entrada de nuevo material transportado por la lluvia desde toda la cuenca. El PC2 está relacionado con la conductividad, los sólidos disueltos y la creciente cantidad de material inorgánico como las sales. Se encontró que los valores de la Laguna Cumunni están correlacionados con DBO, DQO y pH, debido a la síntesis de materia orgánica e inorgánica, lo que conduce a un mayor consumo de OD disponible en el sistema; Los datos de la laguna Lunar, por otro lado,

se asocian con sólidos en suspensión, sólidos disueltos y dureza, lo que se explica por el hecho de que la lluvia transporta materia desde la cuenca, incluidos no solo los suelos sino también el material excedente (material particulado, productos químicos), derivados de los procesos de extracción minera.

TABLA II. Resultados de los componentes principales que describen la relación con cada parámetro para ambas lagunas durante las épocas de estiaje y lluvia.

	Época de estiaje		Época de lluvias	
	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2
pH	0.151	0.018	-0.125	-0.109
Conductividad	-0.154	0.078	0.067	-0.517
Sólidos disueltos	-0.356	-0.048	0.655	0.583
Sólidos suspendidos	-0.006	0.003	0.626	-0.247
DQO	0.492	0.584	-0.199	0.250
DBO	0.673	-0.003	-0.308	0.333
OD	0.035	-0.035	-0.116	0.269
Dureza	-0.172	0.417	0.083	-0.073
Cloruros	0.319	-0.689	-0.064	0.261

Fuente: Elaboración propia

Al analizar cada laguna a la vez para las épocas de estiaje y lluvia, el primer y segundo componentes contribuyen en gran medida a la descripción de los resultados. La Laguna Cumunni en PC1 se relaciona con sólidos disueltos y oxígeno disuelto (OD) que impactan la producción primaria, especialmente los procesos de fotosíntesis; El PC2 se correlaciona con la conductividad y los sólidos disueltos, lo que muestra la importancia del material particulado inorgánico y las sales en el sistema. Los datos de la época de lluvias muestran una correlación con DQO, DBO y OD, debido a la incorporación de agua cruda de la lluvia y aún existe un proceso de síntesis biológica en ella. Por otro lado, los valores de la estación seca en la Laguna Cumunni muestran una correlación con los sólidos en suspensión, y los últimos parámetros mencionados no muestran una asociación

relevante. Esto se debe a que las personas que viven cerca de la zona utilizan esta laguna para lavar la ropa y, mientras el nivel del agua disminuye, los fenómenos naturales inducen la suspensión de material previamente sedimentado.

La laguna lunar muestra, para PC1, una asociación con sólidos disueltos y suspendidos, que proviene de la entrada continua de agua con grandes cantidades de material. El PC2 está relacionado con DQO, dureza y cloruros, que está relacionado con la química del agua y la síntesis de partículas inorgánicas y material disuelto en la laguna. Los datos de la temporada de lluvias en Laguna Lunar, a pesar de la entrada de aguas residuales y otros efluentes artificiales, muestran una baja correlación con sólidos en suspensión y disueltos, y una asociación aún menor con DQO y DBO debido a concentraciones muy bajas de oxígeno. Mientras tanto, durante la época de estiaje, existe una correlación muy baja con el pH, así como una concentración de oxígeno disuelto muy baja disponible para los procesos DQO y DBO.

TABLA III. Parámetros para cada laguna en la época de estiaje y lluvia

	Cumunni		Lunar	
	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2
pH	-0.015	0.282	-0.058	-0.082
Conductividad	0.337	0.584	0.104	0.105
Solidos disueltos	0.552	-0.634	0.680	-0.106
Solidos suspendidos	0.114	0.130	0.690	0.013
DQO	0.064	0.007	0.062	0.690
DBO	0.087	0.223	0.048	-0.191
OD	0.695	0.197	0.124	0.169
Dureza	0.232	0.089	0.074	0.560
Cloruros	0.138	-0.253	0.141	-0.341

Fuente: Elaboración propia

En resumen, estadísticamente, Cumunni tiene una correlación más fuerte con parámetros biológicamente relacionados, como DBO, OD, pH, DQO.

Esto indica que hay una menor calidad del agua debido a que aún se están produciendo procesos ecológicos (Tabla III). Para la laguna Lunar, existe mayor asociación con parámetros relacionados con conductividad, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, lo que evidencia la alta concentración de sales y materia inorgánica en el sistema. Este entorno inhibe los procesos biológicos, por lo que la concentración de oxígeno disuelto es baja.

Los resultados para metales pesados en las lagunas (Tabla IV) muestran que en su mayoría superan los valores regulatorios establecidos por las normas EQS y Canadiense de Calidad Ambiental, con excepción de cobre y mercurio. Aunque este último, fue reportado en el año 2019 en una cuenca derivada de la Laguna lunar con concentraciones de 0,055 y 0,068mg/L de Hg que superan las normas comparativas (Mamani-Navarro, et al., 2019). Los valores de los metales pesados más altos corresponden a la época de estiaje, debido a la concentración de estos, a medida que desciende el nivel del agua en las lagunas. Las aguas muestran contaminación con altas concentraciones de zinc y hierro. Este último puede existir en sus diferentes estados de oxidación o también puede estar depositado en forma de hidróxidos. La ingesta de zinc se relaciona con diversos trastornos neurológicos, inmunológicos, renales, hepáticos y cardiovasculares (Rodríguez, 2017). Los valores más altos de arsénico se reportaron en época de estiaje, con 0,043 y 0,058 mg/l para las lagunas Cumunni y Lunar, respectivamente. Existen evaluaciones del año 2017 en el río Coata que desemboca al Lago Titicaca, el cual guarda relación geográfica con la Laguna Lunar, con valores de 0,03mg/L de este metal (Capacoila, 2017) que exceden las regulaciones canadienses (CEQG). Estudios muestran que Argentina, Chile y Perú están expuestos a altos niveles de arsénico en agua, especialmente la de origen subterráneo (Gonzales, et al., 2014). Además, en los seres humanos, la toxicidad crónica por arsénico provoca lesiones cutáneas (queratosis, hiperpigmentación) y lesiones vasculares en el sistema nervioso e hígado. También se reportaron diferentes tipos de cáncer en el hígado, vejiga y riñón (Londoño-Franco, et al., 2016; Rodríguez, 2017). En el caso del plomo, se encontraron concentraciones que superan los LMP de ambos conjuntos de normativas, con valores de 0.03 mg/L y 0.04 mg/L para las lagunas Cumunni y Lunar,

respectivamente. Aunque estos valores no superan mucho los límites, es importante reportarlos, dado que el plomo es un xenobiótico, interfiere en el metabolismo de la vitamina D, cuando el metal se deposita en forma de fosfato de plomo en huesos de rápido crecimiento y luego compite con el calcio y hierro provocando hipocalcemia, anemia y alteraciones del sistema nervioso periférico (Rodríguez, Cuellar, Maldonado y Suardiaz, 2016).

TABLA IV. Valores de metales en lagunas Cumunni y Lunar

Época lluviosa (mg/L)								
Metales	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn
Cumunni	0.022	0.010	0.082	2.03	< 0,001	0.88	0.02	6.792
Lunar	0.024	0.002	< 0.002	2.65	< 0.001	0.35	0.04	2.020
EQS 4:E-1	0.15	0.00025	0.1	-	0.0001	0.05	0.002	0.12
CEQG	0.005	0.00009	$e^{0.8545}$ [ln-hardness] - 1.465 * 0.2 µg/l		0.000026	$e^{0.76}$ [ln-hardness] + 1.06 µg/l	$e^{1.273}$ [ln-hardness] - 4.705 µg/l	0.03
Época de estiaje (mg/L)								
Metales	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn
Cumunni	0.043	0.024	0.090	2.57	< 0,001	1.03	0.03	7.89
Lunar	0.058	0.011	< 0.002	3.01	< 0.001	0.67	0.04	3.52
EQS 4:E-1	0.15	0.00025	0.1	-	0.0001	0.05	0.002	0.12
CEQG	0.005	0.00009	$e^{0.8545}$ [ln-hardness] - 1.465 * 0.2 µg/l		0.000026	$e^{0.76}$ [ln-hardness] + 1.06 µg/l	$e^{1.273}$ [ln-hardness] - 4.705 µg/l	0.03

Fuente: Elaboración propia

En el caso de sedimentos, los resultados indican que la mayoría de las concentraciones de metales exceden las estipulaciones por ISQG, PEL y NOAA (Tabla V). Las concentraciones de los metales aumentan durante la época de estiaje, debido a la mayor sedimentación por déficit de arrastre y disminución del caudal de agua. Para ambas lagunas, los valores más altos encontrados fueron arsénico, níquel, hierro y mercurio. La concentración más alta de As fue de la laguna Lunar con 56.92mg/Kg. Valor que supera

en demasía a los diferentes estándares comparativos. La exposición crónica al As inorgánico se ha asociado con diversas formas de cánceres y numerosos otros efectos patológicos en los seres humanos, conocidos colectivamente como arsenicosis (Bjørklund, Aasetth, Chirumbolo Urbina y Uddin, 2017).

Los resultados de mercurio elevados en sedimentos se encontraron en época de estiaje con 12,14 y 33,32 mg/Kg en las lagunas Cumunni y Lunar, respectivamente. Datos que evidencia la utilización excesiva de esta sustancia para la extracción del oro. El Perú ocupa el tercer lugar en el mundo en términos de cantidad de mercurio utilizado, detrás de China y Colombia (Díaz-Arriaga, 2014), utilizando 70 toneladas de mercurio al año para extraer 188 toneladas de oro. Significa que, por cada tonelada de oro, requieren 370 kg de mercurio. Este metal puede estar presente en diferentes estados: elemental, formando compuestos inorgánicos (combinaciones con cloro, azufre y oxígeno) y orgánicos (combinado con carbono, como metilmercurio). Este último se genera en los ecosistemas acuáticos por la metilación del mercurio inorgánico, puede ser bioacumulado por los organismos y generador de intoxicación a lo largo de la cadena alimentaria. Su ingesta está relacionada con daños cerebrales, sistema cardiovascular, tipos de cáncer, (Reyes, Aasetth, Chirumbolo, Urbina y Uddin, 2016) así su inhalación reportó, insomnio, debilidad de la memoria, depresión, hiperreflexia tendinosa, entre otras (Vahabzadeh y Balali-Mood, 2016). Así mismo, se han reportado que los niños tienen una mayor susceptibilidad a los efectos neurológicos adversos del mercurio, en comparación con los adultos con similares exposiciones (Andreoli, 2017), lo cual es una alerta para la población de la Rinconada, ya que los niños y adolescentes se encuentran involucrados directamente en esta actividad. La intoxicación por mercurio no tratada a tiempo, aun por derrames accidentales en los hogares, traen complicaciones a nivel neuronal (Kamensky, Horton, Kingsley y Brigdes, 2019), lo cual debe tenerse muy en cuenta en los hogares de la población investigada, ya que se ha observado la quema de amalgama de oro y mercurio dentro de las mismas viviendas.

Los valores de mercurio encontrados en las lagunas de estudio son altos en comparación con los sedimentos del río Aboado (10mg/Kg), ubicado en el distrito de Asutifi en Ghana - India. Se informa que este río también se ve afectado por la extracción de oro artesanal (Adjei-Kyereme, Donkor, Golow, Yeboah y Pwaman, 2015). Asimismo, se encontraron valores entre 2.5 y 3.0 mg/kg de mercurio en sedimentos del río Puyango-Ecuador (Mora, Jumbo-Flores, González-Merizalde y Bermeo-Flores, 2016). Para la mayoría de los organismos, la exposición a metales pesados que exceden las concentraciones umbral puede ser extremadamente tóxica. Los metales toxicológicos y ecotoxicológicos en los medios acuáticos son el Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn. Los metales encontrados en los sedimentos de la Laguna Lunar pueden correr a lo largo de los ríos donde fluye como Río Grande y Cuenca Ramis, donde se han observado criaderos de truchas; esto abre la posibilidad de que estos peces se encuentren contaminados.

TABLA V. Valores de metales en sedimentos de lagunas Cumunni y Lunar

Época lluviosa mg/kg									
Metales	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn	
Cumunni	38.18	0.15	13.73	12666.44	8.07	12.09	5.92	88.15	
Lunar	56.92	0.84	13.75	27142.88	20.13	11.76	18.23	140.20	
CEQG	ISQG	5.9	0.6	35.7		0.17	-	35	123
	PEL	17	3.5	197		0.486	-	91.3	315
NOAA	1.1	0.1 – 0.3	10 – 25		0.004 – 0.0051	9.9	4-17	7-38	
Época estiaje mg/kg									
Metales	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn	
Cumunni	56.78	0.34	15.22	18766.40	12.14	22.54	7.72	105.15	
Lunar	66.71	1.11	18.76	42040.11	33.32	25.46	21.83	236.65	
CEQG	ISQG	5.9	0.6	35.7		0.17	-	35	123
	PEL	17	3.5	197		0.486	-	91.3	315
NOAA	1.1	0.1 – 0.3	10 – 25		0.004 – 0.0051	9.9	4-17	7-38	

ISQG: Guía provisional de calidad de sedimentos/ PEL: Nivel de efecto probable/ NOAA: Administración Nacional de Estados Oceánicos y Atmosféricos.

Fuente: Elaboración propia

La calidad de agua, superficial o subterránea depende de factores naturales como de la acción humana. Sin la acción humana, la calidad del agua vendría determinada por la erosión del substrato mineral, los procesos atmosféricos de sedimentación de lodos y sales, la lixiviación natural de la materia orgánica y los nutrientes del suelo y los procesos biológicos en el medio acuático. Una masa de agua sin contaminar está saturada de oxígeno disuelto mayor a 5mg/L, presentado pH entre 5,5 a 9.0, generalmente libre de grasas, aceites, cianuro y mercurio. Bajo estas condiciones los organismos acuáticos tienen un hábitat ideal, de la misma manera que la flora acuática, brindando las condiciones necesarias para la conservación de los ecosistemas, acelerando la mineralización de las excretas de los animales y de la vegetación en descomposición, y cumpliendo el rol trascendental de oxigenar el agua. Al ser contaminada las masas de aguas con material orgánico u inorgánico como son los metales pesados, la composición físico-química del agua varía inmediatamente en pH, turbidez, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto el cual es consumido por la materia orgánica, dejando sin él a los seres vivos. De esta manera, la calidad de agua se ve degradada y genera el descenso absoluto de especies, tanto flora y fauna. Este panorama fue evidenciado en las lagunas Cumunni y Lunar de la Mina Rinconada, donde los valores tan ácidos de pH, la ausencia de oxígeno y la excesiva presencia de mercurio no permiten ni permitirán el desarrollo de ninguna especie.

Conclusión

La evaluación fisicoquímica en las muestras de las Lagunas Cumunni y Lunar de la Rinconada, tanto en agua como en sedimento, arrojó valores que superan en su mayoría a las normativas peruanas y canadienses, así como los valores de referencia de Estados Unidos. Los resultados demuestran aguas muy ácidas, con pH que oscila entre $2,14 \pm 0,08$ a $4,61 \pm 0,37$; según la dureza se clasifican en aguas duras y muy duras. La conductividad, OD, DQO y DBO_5 superan el LMP de los estándares peruanos. Se evidenciaron metales pesados en ambas lagunas, las cuales en su mayoría superan los valores regulatorios establecidos. El valor más alto de metales en sedimento fue del mercurio en la laguna Lunar con

20,13 mg/kg y 33,32 mg/kg en la estación lluviosa y seca, respectivamente. El vertido de aguas residuales sin tratamiento previo ha contaminado totalmente la laguna Lunar, lo que junto con los lechos sedimentarios de los lagos también pueden contaminar otros cuerpos de agua y sus cadenas tróficas. Asimismo, las personas que viven alrededor de la mina Rinconada están en peligro de intoxicación cuando utilizan agua de estas fuentes para sus actividades domésticas.

Referencias Bibliográficas

- Adjei-Kyereme, Y., Donkor, A. K., Golow, A. A., Yeboah, P.O. y Pwaman, J. (2015). Mercury Concentrations in Water and Sediments in Rivers Impacted by Artisanal Gold Mining in the Asutifi District, Ghana. *Res Journal Chemical Environmental Science*, 3,40-48.
- Andreoli, V. y Sprovieri, F. (2017). Genetic Aspects of Susceptibility to Mercury Toxicity: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, (14), 93.
- Baque-Mite, R., Simba-Ochoa, L., González-Ozorio, B., Suatunce, P., Diaz-Ocampo, E. y Cadme-Arevalo, L. (2016). Calidad del agua destinada al consumo humano en un cantón de Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 9(20),109 – 117.
- Bellos, D. y Sawidis, T. (2005). Chemical pollution monitoring of the River Pinios (Tesalia-Greece). *Journal of Environmental Management*, 76, 282-292.
- Bjørklund, G., Aasetth, J., Chirumbolo, S., Urbina, M. y Uddin, R. (2018). Effects of arsenic toxicity beyond epigenetic modifications. *Environmental Geochemistry and Health*, (40), 955–965.
- Capacoila, J. (2017). Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales del río Coata. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola.
- Díaz-Arriaga, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 947-957.
- Fransisca, Y., Small, D.M., Morrison, P.D., Spencer, M.J.S., Ball, A.S. y Jones, O.A.H. (2015). Assessment of arsenic in Australian grown

- and imported rice varieties on sale in Australian and potential links with irrigation practices and soil geochemistry. *Chemosphere*, 138, 1008-1013.
- Gonzales, G., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K. y Steenland, K. (2014). Contaminación Ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental Salud Pública*, 31(3), 547-56.
- Goyzueta, G. y Trigos, C. (2009). Riesgos de salud pública en el centro poblado minero artesanal la Rinconada (5200 msnm) en Puno, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental Salud Pública*, 26(1), 41-44.
- Kamensky, O., Horton, D., Kingsley, D. y Brigdes, C. (2019). A Case of Accidental Mercury Intoxication. *J. Emerg. Med.* 56 (3), 275-278.
- Legendre, P. L. y Legendre. (1998). Numerical Ecology, 2nd English ed. Elsevier, pp. 853.
- Li, N., Kang, Y., Pan, W., Zeng, L., Zhang, Q. y Luo, J. (2015). Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China. *Science Total Environmental*, 15(521-522), 144-51.
- Londoño-Franco, L.F, Londoño-Muñoz, P.T. y Muñoz-García, F.G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153.
- Mamani-Navarro, W., Inofuente-Ccarita, W., De-La-Cruz-Paredes, D., Zea-Sacachipana, N., Salas-Sucaticona, R., Mamani- Coaquira, D. y Sucapuca-Mamani, R. (2019). Adsorción de metales pesados de aguas residuales de la mina Lunar de Oro con carbón activado de lentejas de agua. *ÑAWPARISUN-Revista de investigación Científica*, 1 82), 13-20.
- Molina, C., Ibañez, C. y Gibon, F.M. (2013). Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología*, 47(2), 99-

118.

- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W. y Jambor, J.L. (2004). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 20, 639-659.
- Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., Bermeo-Flores, M. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río puyango, ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 385-397.
- Osinerming. (2016). Organismo Superior de la Inversión en energía y minería. Reporte de Análisis Económico Sectorial Minería Año 5: N° 6 agosto 2016. Pág. 13. [En línea] http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Mineria-Agosto-2016-GPAE-OS.pdf.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz-Lagos, M. y González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rodríguez, A., Cuellar, L., Maldonado, G. y Suardiaz, M. (2016). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(3).
- Rodriguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados Occupational poisoning due to heavy metals. *MEDISAN*, 21(12),3372.
- Sierra, C. 2016. Calidad del Agua: evaluación y diagnóstico. Medellín, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Soto-Cruz, O., Carrillo-Chávez, J. y Suárez-Sánchez, J. (2011). Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos del río Zahuapan, Tlaxcala, México. En R. Jiménez-Guillen, M. L.
- Talledos, E. 2017. El extractivismo en la agroexportación, la minería y las hidroeléctricas en Latinoamérica. *Investigaciones Geográficas*. Número 94.
- Vahabzadeh M. y Balali-Mood, M. (2016). Occupational metallic mercury poisoning in gilders. *Int J Occup Environ Med*. 7,116-122.
- Wen-Cheng, L., Hwa-Lung, Y., Chung-En, C. 2011. Assessment of water quality in a subtropical alpine Lake using multivariate statistical

techniques and geostatistical mapping: A case study. Int. Journal of Environmental Research. Public Health 8:1126-1140.

Artículo Recibido: 23-11-2020

Artículo Aceptado: 5-02-2021