

HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COMO ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN EFLUENTES DE MINERÍA AURÍFERA

HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS AS AN ALTERNATIVE FOR HEAVY METAL REMOVAL IN GOLD MINING EFFLUENTS

Recibido/Received: 31/06/2024

Aceptado/Accepted: 30/08/2024

AUTORES

Edwin Fernando Sierra Gaviria: Ingeniero Ambiental y Sanitario, Magíster en Ingeniería Ambiental, Docente investigador de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

Karol Daniela Fernández Vargas: Investigadora de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

César Fernández Morantes: Químico y Doctor en Ingeniería. Docente investigador de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

Arnol Arias Hoyos: Biólogo, Especialista en Educación, maestrante en Gestión y Auditorías Ambientales. Docente investigador de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

Semillero en Manejo Integral del Recurso Hídrico - MIRH
Grupo de Investigación en Tecnologías y Ambiente - GITA
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Para citar este artículo: Sierra-Gaviria, E., Fernández, K., Fernández, C. y Arias, A. (2025). Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal como alternativa para la remoción de metales pesados en efluentes de minería aurífera. *Revista Sapientia*, 17(33), 63-71. Doi: 10.54278/sapientia.v17i33.261

RESUMEN

En la actualidad, uno de los problemas con mayor connotación que acarrea la humanidad se encuentra centralizado en la contaminación ambiental, donde la calidad del recurso hídrico, el aire y el suelo se encuentran en constante detrimento, influyendo sustancialmente en la salud pública y el bienestar y forma de vida de los individuos. Así pues, la minería aurífera artesanal desata diversos problemas de índole ambiental, principalmente a la matriz hídrica, dado que los residuos líquidos producto del beneficio de oro son vertidos al suelo y cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento. De acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la remoción de metales pesados presentes en efluentes mineros. La ejecución del estudio consistió en tres fases, integradas por una caracterización fisicoquímica del efluente, posteriormente, el diseño y construcción del humedal a escala piloto, finalmente, la operación y seguimiento para la evaluación de la eficiencia de remoción. Se lograron detectar trazas de mercurio y plomo que no cumplen con la normativa colombiana para vertimientos (Resolución 0631 de 2015). Así mismo, se diseñó un sistema de humedales construidos que permitieron evaluar la eficiencia de dos tipos de macrófitas para la remediación ambiental del efluente.

PALABRAS CLAVE

Humedales construidos, Minería aurífera, Metales pesados, Tratamiento de aguas residuales, Biorremediación.

ABSTRACT

Currently, one of the most significant problems facing humanity is centered on environmental pollution, where the quality of water resources, air and soil are in constant detriment, substantially influencing public health and the well-being and way of life of individuals. Thus, artisanal gold mining causes various environmental problems, mainly to the water matrix, since the liquid waste from gold mining is discharged into the soil and bodies of water without any type of treatment. Accordingly, the objective of this research is to evaluate the efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland in the removal of heavy metals present in mining effluents. The execution of the study consisted of three phases, integrated by a physicochemical characterization of the effluent, then, the design and construction of the constructed wetland at pilot scale, and finally, the operation and monitoring for the evaluation of the removal efficiency. We were able to detect traces of mercury and lead that do not comply with Colombian regulations for discharges (resolution 0631 of 2015). Likewise, a system of constructed wetlands was designed to evaluate the efficiency of two types of macrophytes for the environmental remediation of the effluent.

KEYWORDS

Constructed wetlands, Gold mining, Heavy metals, Wastewater treatment, Bioremediation.

MARCO TEÓRICO

Los procesos de extracción y beneficio de Minería aurífera Artesanal y de Pequeña Escala MAPE, actualmente tienen una marcada connotación en el desarrollo de las economías en las regiones, lo cual ha incidido en un notorio crecimiento de las prácticas auríferas (Gallo et al., 2021). Sin embargo, los procesos de producción de oro han sido motivo de discusión en diferentes escenarios, puesto que generan afectaciones que repercuten en el ambiente, sociedad y salud pública, repercutiendo en la calidad de vida de las poblaciones (Habashi, 2016).

De acuerdo con lo anterior y en aras de realizar una conceptualización, a continuación, se presentan los tópicos claves en la ejecución de la presente investigación, además de considerar antecedentes que permiten identificar el avance científico en la implementación de humedales como alternativa de remoción de contaminantes, en específico de metales pesados, que contribuyan con el robustecimiento teórico y empírico del estudio.

En ese contexto, es pertinente mencionar que una de las técnicas más empleadas en el beneficio aurífero es la amalgamación, la cual utiliza grandes concentraciones de mercurio (Hg) para realizar la separación del oro de otros minerales, cabe mencionar que este metal pesado es agregado en la trituration y molienda del material rocoso, permitiendo la formación de la amalgama, la cual es calentada para evaporar el mercurio de la aleación, teniendo como resultado el preciado metal (ver Figura 1). Así pues, la problemática del empleo de esta técnica se centra en que la formación de la amalgama solo requiere del 10% del Hg total usado, lo cual significa que el porcentaje restante es dispuesto en el medio ambiente a través del aire y el agua (Habashi, 2016).

Figura 1. Proceso de amalgamación con mercurio.



Es así como, el uso del mercurio en la producción minera aurífera ha despertado preocupación en la comunidad científica, puesto que posee la capacidad de biotransformarse al ingresar al medio ambiente, a través de su forma orgánica de metilmercurio (MeHg), metabolizada por acción microbiana, facilitando el ingreso a la cadena alimentaria (Beckers & Rinklebe, 2017). Así pues, es importante comprender las dinámicas de persistencia y permanencia del mercurio en el ambiente, puesto que este metal pesado también tiene la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse (ver Figura 2); el primer constructo hace referencia a la facilidad del MeHg para incorporarse y acumularse en los tejidos de los organismos, por su parte, el segundo se centra en la acumulación progresiva del nivel de mercurio (en su forma orgánica) en la cadena trófica (Salazar-Camacho et al., 2022).

Figura 2. Bioacumulación y biomagnificación del mercurio.

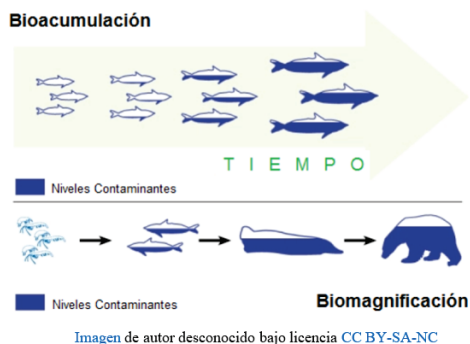


Imagen de autor desconocido bajo licencia CC BY-SA-NC

Teniendo en cuenta lo mencionado con antelación, la investigación se sustenta normativamente a través de la Ley 1658 de 2013, emitida por el Gobierno Nacional de Colombia, en el cual se establecen los lineamientos y disposiciones direccionadas al uso y comercialización del mercurio en los procesos industriales desarrollados en el territorio nacional; entre las directrices se define la prohibición del mercurio, la transición a tecnologías limpias que contribuyan con la sustitución de Hg y el fomento de investigaciones desde la académica para hacerle frente a los procesos de extracción minera aurífera que utilizan este metal pesado como agente de producción de oro (Ley 1658 de 2013, 2013).

Así mismo, en un panorama nacional, Delgado et al. (2020) realizaron un estudio con el propósito de evaluar la remoción de contaminantes emergentes (metilparabeno -Mp-, sildenafil -Sil- y carbamazepina -Cbz-) de origen farmacéutico y de

cuidado personal presentes en las aguas residuales domésticas a través de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial; en este sistema utilizaron dos tipos de macrófitas *Heliconia Zingiberales* y *Cyperus Haspan*, obteniendo eficiencias para Mp y Sil superiores al 97%, mientras que para Cbz del 10%, adicionalmente, sostiene que la remoción de materia orgánica fue del 95% (Delgado et al., 2020). Así pues, esto permite identificar que es posible utilizar este tipo de macrófitas en el tratamiento de aguas residuales, donde es interesante evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados provenientes de la industria de minería aurífera.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la remoción de metales pesados presentes en efluentes mineros.

Objetivos específicos

- Caracterizar las aguas residuales provenientes de un entable de Minería Aurífera Artesanal a Pequeña Escala – MAPE.
- Diseñar un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de efluentes de MAPE.
- Determinar la eficiencia del humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la remoción de metales pesados.

METODOLOGÍA

La metodología con enfoque cuantitativo se encuentra dividida en tres fases, que corresponden a la ejecución de cada uno de los objetivos específicos planteados, las cuales son relacionadas a continuación:

Caracterización de aguas residuales

Se realizó la caracterización de un efluente de minería aurífera artesanal en el departamento del Cauca, Colombia. Se realizaron 3 muestreos en el punto de vertimiento directo de las aguas residuales, para ello, se consideraron las directrices

de toma de muestras de aguas residuales (IDEAM, 2007). Para determinar las condiciones iniciales del efluente de beneficio aurífero se consideraron parámetros fisicoquímicos como Sólidos Disueltos Totales SDT, Sólidos Sedimentables SSED, pH, Sulfuros, Cobre, Plomo, Mercurio, Color, Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, Oxígeno Disuelto OD, Demanda Química de Oxígeno DQO y Temperatura.

Análisis de parámetros fisicoquímicos

Los parámetros in situ fueron turbiedad, medido con un turbidímetro HACH 2100Q y pH, OD y temperatura, con equipo multiparamétrico YSI Pro-Plus. Por su parte, los parámetros ex situ fueron SDT, SEED, sulfuros, cobre, plomo, mercurio, color, DBO y DQO, fueron determinados de acuerdo con el Standard Methods y kits de la marca NANOCOLOR (ver tabla 1) (American Public Health Association et al., 2017).

Tabla 1. Métodos para la determinación de parámetros ex situ.

No	Parámetro	Método
1	Sólidos Disueltos Totales - SDT	APHA 2540B
2	Sólidos Sedimentables - SEED	APHA 2540F
3	Sulfuros	Visocolor ECO 931094
4	Cobre	Visocolor ECO 931037
5	Plomo	NANOCOLOR 986009
6	Mercurio	APHA SM 3112B
7	Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO	APHA 5220D
8	Demanda Química de Oxígeno - DQO	APHA 5220D
9	Color	APHA 2120C

Diseño del humedal construido de flujo subsuperficial a escala piloto

Se realizó el diseño de un sistema de humedales de flujo subsuperficial horizontal, con el objeto de evaluar la eficiencia de remoción principalmente con enfoque en metales pesados provenientes de efluentes de minería aurífera, para ello, se tuvo en cuenta la Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales (APHA (American Public Health Association), 1999).

Operación y monitoreo del funcionamiento del sistema de humedales construidos

El seguimiento del funcionamiento y calidad de agua se realizó durante un periodo de 2 meses con frecuencias de medición de 6 días, tomando como puntos de muestreo referencia a la entrada y salida del sistema. Las muestras fueron tomadas y almacenadas en frascos de plástico estéril y posteriormente enviadas a laboratorio para análisis de los parámetros fisicoquímicos (IDEAM, 2007).

Eficiencia de remoción

Para la determinación de la eficiencia de remoción del sistema, se tuvo en cuenta los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en la operación y monitoreo de la calidad del agua en el sistema de humedales. Se consideraron las concentraciones de entrada y salida para cada uno de los parámetros, se calcularon a través de la Ecuación 1.

$$ER = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

ER: Eficiencia de remoción (%)

C_o: Concentración de entrada al sistema (m.g. L⁻¹)

C_r: Concentración de salida al sistema (m.g. L⁻¹)

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en el decurso del estudio son analizados estadísticamente en el software R, para ello, se considerará un análisis de varianza

ANOVA de un factor, evaluando cada parámetro por separado, así mismo, se considerará pruebas de homogeneidad de varianzas de Leven's y normalidad de Shapiro-Wilk con significancia del 95% (Mozzaffari et al., 2021).

RESULTADOS

Caracterización de aguas residuales

La caracterización fisicoquímica del agua residual del entable minero aurífero, presentada en la Figura 2, indica que los valores obtenidos para los parámetros analizados se encuentran, en general, dentro de un rango relativamente homogéneo en comparación con la media (Resolución 0631, 2015). Sin embargo, al confrontar estos resultados con los límites establecidos en la normativa nacional para vertimientos, se observa un incumplimiento significativo en cuanto a los parámetros de sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), mercurio y plomo.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del efluente minero.

No	Parámetro	Resultado	Resolución 0631 de 2015	
			Valor permisible	Cumplimiento
1	Turbiedad (NTU)	533,33 ± 1,50	N/A	---
2	pH	7,7 ± 0,2	6,00 - 9,00	SI
3	OD (m.g. L ⁻¹)	7,6 ± 0,3	N/A	---
4	Temperatura (°C)	25,1 ± 0,5	N/A	---
5	SST (m.g. L ⁻¹)	418,33 ± 0,7	50,00	NO
6	SEED(m.g. L ⁻¹)	1,00 ± 0,20	2,00	SI
7	Sulfuros (m.g. L ⁻¹)	0,3 ± 0,1	1,00	SI
8	Cobre (m.g. L ⁻¹)	0,4 ± 0,1	1,00	SI
9	Plomo (m.g. L ⁻¹)	0,35 ± 0,10	0,20	NO
10	Mercurio (m.g. L ⁻¹)	0,118 ± 0,050	0,002	NO
11	Color (UPC)	45,63 ± 0,40	Análisis y reporte	---
12	DBO ₅ (m.g. L ⁻¹)	46,2 ± 0,8	50,00	SI
13	DQO(m.g. L ⁻¹)	178,4 ± 0,4	150,00	NO

En ese contexto, los resultados del análisis de calidad del agua revelan que, aunque la turbiedad no posee un límite máximo permisible, presentó valores elevados, por su parte, los sólidos suspendidos totales excedieron ampliamente los límites permitidos. En efecto, esta condición permite evidenciar que existe una elevada concentración de partículas suspendidas (principalmente sedimentos finos, minerales y otros sólidos provenientes del beneficio de oro), tiene implicaciones negativas que ponen en riesgo la supervivencia de la biota acuática (Torres et al., 2018).

Por otro lado, el resultado de pH se encuentra dentro del rango permitido por la normativa nacional, así mismo, puede indicar condiciones que tienen a ser ligeramente alcalinas, posiblemente asociado a la presencia de minerales y sustancias carbonáceas. Por su parte, la temperatura media del agua residual puede favorecer el tratamiento biológico de las aguas residuales (Ramírez, 2021).

El nivel de oxígeno disuelto de 7,6 mg/L es relativamente alto, indicando que el agua tiene una capacidad adecuada para soportar vida acuática y procesos biológicos aeróbicos. Sin embargo, la DBO5 de 46,2 mg/L señala una cantidad significativa de materia orgánica biodegradable, lo cual puede llevar al consumo de oxígeno por parte de microorganismos durante la descomposición de estos compuestos. Respecto a la DQO de 178,4 mg/L, que es considerablemente más alta que la DBO5, sugiere la presencia de sustancias no biodegradables que también demandan oxígeno (Sharma & Malaviya, 2022). Esta diferencia notable entre DBO y DQO indica que, además de la materia orgánica biodegradable, hay contaminantes resistentes a la biodegradación y posiblemente compuestos tóxicos presentes en el efluente minero.

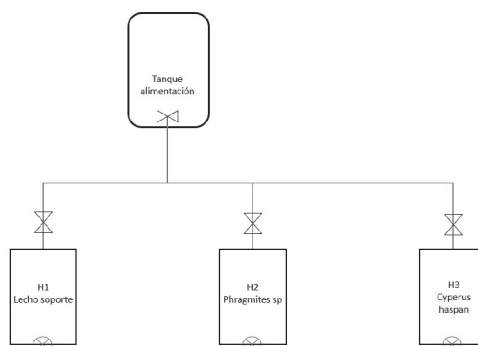
En cuanto a los metales pesados, se logró identificar la presencia de trazas de mercurio, plomo y cobre, estos dos primeros superan los límites máximos permisibles por la normatividad. Esa situación es preocupante, dado que su toxicidad genera altos riesgos para la salud ambiental y pública, por su alta capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en el cuerpo (Novoa Villa et al., 2022; Samuel et al., 2022). De ahí la importancia de promover alternativas de tratamiento para la remoción de contaminantes que tienen severas implicaciones en el detrimento de la calidad ambiental.

Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal son especialmente eficaces para la remoción de metales pesados como mercurio, plomo y cobre, gracias a procesos de adsorción, precipitación y bioacumulación. Además, estos sistemas son efectivos en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), mejorando significativamente la calidad del agua.

Se realizó el diseño de un sistema de humedales de flujo subsuperficial horizontal, siguiendo los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental, para la proyección del sistema a escala piloto se utilizó como criterio de partida la concentración de mercurio de la caracterización del efluente minero (ver Tabla 2). El sistema cuenta con tres humedales en paralelo (ver Figura 3), el primero contiene únicamente el lecho de soporte, mientras que los dos restantes poseen plantación de macrófitas, para H2 *Phragmites* sp y *Cyperus haspan* para H3.

Figura 3. Sistema de humedales construidos a escala piloto.



El sistema posee capacidad para tratar un caudal de 144 L/día en flujo continuo, con un tiempo de retención hidráulica para de 3 días. Respecto al lecho de soporte se utilizó grava gruesa (~20 mm de diámetro), grava fina (~5 mm de diámetro) y arena gruesa (~2 mm de diámetro), los demás parámetros de diseño se especifica en la tabla 3 (Singh & Chakraborty, 2020).

Tabla 3. Criterios para el diseño del sistema de humedales.

Criterio	Descripción
Caudal	144 L. día ⁻¹
Tiempo de retención hidráulica	3 días
Dimensiones	0,2m * 0,8m * 0,25m
Volumen lecho de soporte	0,0672 m ³
Lecho de soporte	Grava gruesa Grava fina Arena gruesa
Macrófitas	<i>Phragmites sp</i> y <i>Cyperus haspan</i>

CONCLUSIONES

Se logró realizar la caracterización de un efluente de minería aurífera artesanal y a pequeña escala MAPE, en ella, se identificó la presencia de metales pesados de interés ambiental como lo son Mercurio y Plomo, con concentraciones de 0,118 mg. L⁻¹ y 0,35 mg.L⁻¹, los cuales no cumplen con los límites máximos permisibles de la normatividad colombiana para vertimientos de agua residual, generando riesgos inminentes a la calidad ambiental y a la salud pública, dado que son contaminantes que poseen la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en el cuerpo. Esto sugiere la necesidad de promover alternativas tecnológicas para el tratamiento de los efluentes mineros, que contribuyan con la sostenibilidad del beneficio aurífero.

Así mismo, se realizó el diseño de un sistema de humedales de flujo subsuperficial horizontal, con el objeto de tratar las aguas residuales del entable minero, focalizados principalmente en la remoción de metales pesados y carga orgánica. Este tipo de sistema de tratamiento aprovecha la capacidad natural de ciertos microorganismos, plantas y el sustrato para degradar y estabilizar contaminantes presentes en el agua.

El diseño de este sistema no solo tiene un enfoque técnico, sino que también se ha considerado su viabilidad operativa, eficiencia y costo económico, haciéndolo accesible para los mineros artesanales y de pequeña escala. La implementación de humedales artificiales como tecnología de biorremediación proporciona una solución sostenible y de bajo mantenimiento, utilizando recursos locales y naturales. Esto no solo ayuda a mitigar el impacto ambiental de la minería, sino que también promueve prácticas de minería responsable y sostenible.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍAS

Investigación: Edwin Fernando Sierra Gaviria, Karol Daniela Fernández Vargas, César Fernández Morantes y Arnol Arias Hoyos

Redacción – borrador original: Edwin Fernando Sierra Gaviria, Karol Daniela Fernández Vargas, César Fernández Morantes y Arnol Arias Hoyos

Redacción – revisión y edición: Edwin Fernando Sierra Gaviria, Karol Daniela Fernández Vargas, César Fernández Morantes y Arnol Arias Hoyos

REFERENCIAS

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (R. Baird, A. Eaton, & E. Rice, Eds.; 23rd ed., Issue 9). American Public Health Association.

APHA (American Public Health Association). (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.).

Beckers, F., & Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(9), 693–794. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>

Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X., & Chang, J. (2021). Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes. *Bioresource Technology*, 331(March), 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>

Delgado, N., Bermeo, L., Hoyos, D. A., Peñuela, G. A., Capparelli, A., Marino, D., Navarro, A., & Casas-Zapata, J. C. (2020). Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands. *Water Research*, 187, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116448>

Gallo, J., Vargas, L., Velasco, M., Gutiérrez, L., & Pérez, E. (2021). Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia. *Resources Policy*, 73, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>

Habashi, F. (2016). Gold - An Historical Introduction. *In Gold Ore Processing* (2nd ed., pp. 2–20). Elsevier.

IDEAM. (2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*. http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428

Ley 1658 de 2013. Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones. 15 de julio de 2013. Diario Oficial

48852. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53781>

Mozzaffari, M., Shafiepour, E., Ahmad, S., Rakhshandehroo, G., Wallace, S., & Stefanakis, A. (2021). Hydraulic characterization and removal of metals and nutrients in an aerated horizontal subsurface flow “racetrack” wetland treating primary-treated oil industry effluent. *Bioresource Technology*, 200(March), 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>

Novoa Villa, H. H., Arizaca Avalos, A., Huisa Mamani, F., Novoa Villa, H. H., Arizaca Avalos, 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>

Ramírez, D. F. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 9(1), 100–113. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>

Resolución 0631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 17 de marzo de 2015. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2022). A health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research*, 212, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113120>

Samuel, W., Richard, B., & Nyantakyi, J. A. (2022). Phytoremediation of heavy metals contaminated water and soils from artisanal mining enclave using *Heliconia psittacorum*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 591–600. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01076-2>

Sharma, R., & Malaviya, P. (2022). Constructed wetlands for textile wastewater remediation: A review on concept, pollutant removal mechanisms, and integrated technologies for efficiency enhancement. *Chemosphere*, 290, 133358. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133358>

Singh, S., & Chakraborty, S. (2020). Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India. *Journal of Hazardous Materials*, 397(February), 122719. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>

Torres, J. D., Magno, J. S., Pineda Aguirre, R. R., & Cruz, M. A. (2018). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(2). <https://doi.org/10.17162/rictd.v3i2.657>