

Contaminación hídrica por metales pesados en la cuenca alta del río Moche debido a pasivos ambientales mineros y propuesta de remediación

Water pollution by heavy metals in the upper basin of the Moche river due to mining environmental liabilities and remediation proposal

Sarai Masako Malo Méndez¹, Osvaldo Aduvire Pataca²

Recibido: 03/04/2024 - Aprobado: 27/07/2024 – Publicado: 19/09/2024

RESUMEN

La presente investigación busca identificar el grado de contaminación hídrica por metales pesados en la cuenca alta del río Moche a causa de los pasivos ambientales mineros. Para ello, se analizaron muestras de agua en estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la zona de vertimiento de los drenajes ácidos. Los resultados obtenidos exceden los límites establecidos por el estándar de calidad de agua para la categoría 3 [D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo], con valores de Aluminio (70.48 mg/L), cadmio (3.43 mg/L), cobalto (0.46 mg/L), cobre (31.58 mg/L), manganeso (32.16 mg/L), plomo (1.26 mg/L), zinc (109.50 mg/L) y un pH de 3.69.

A través de la información obtenida de los monitoreos de calidad de agua realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en la estación RChan1, ubicada aguas arriba de la descarga de la quebrada Agua Dulce, los valores se encontraron dentro del estándar de calidad de agua para la categoría 3. Sin embargo, en las estaciones QADul1 y RMoch12 se registraron concentraciones de metales y un pH de 2.89, lo cual está fuera de los límites permitidos por la categoría 3. Estos resultados evidencian el estado crítico actual de la cuenca alta del río Moche.

Palabras claves: calidad de agua, pasivos ambientales mineros, metales, pH, cuenca alta.

ABSTRACT

The present investigation seeks to identify the degree of water contamination by heavy metals in the upper basin of the Moche River due to mining environmental liabilities, therefore water samples from the monitoring stations upstream and downstream of the area were analyzed. discharge of acid drainage. Water quality monitoring was carried out at stations located upstream of the discharge, close to the discharge, and downstream of the discharge, in the "Agua Dulce" creek. The results obtained are outside the Category 3 Water Quality Standard [D1: Irrigation of tall and low stem crops], obtaining values of Aluminum (70.48 mg/L), Cadmium (3.43 mg/L), Calcium (395.80 mg/L), Cobalt (0.46 mg/L), Copper (31.58 mg/L), Manganese (32.16 mg/L), Lead (1.26 mg/L), Zinc (109.50 mg/L) and pH levels (3.69).

Through the information obtained by the water quality monitoring of the "Autoridad Nacional del Agua (ANA)", at the RChan1 station, located upstream of the discharge of the Quebrada "Agua Dulce", values were obtained within the Category 3 Water Quality Standard. However, at the QADul1 y RMoch12 station, the results were values of metals and pH levels (2.89), which is outside the category 3 Water Quality Standard, that demonstrates the current critical state of the upper basin of the Moche River.

Keywords: water quality, mining environmental liabilities, metals, pH, upper basin.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

Autor para correspondencia: sarai.malo@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0350-5069>

2 Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

E-mail: eaduvire@puccp.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-0125>

I. INTRODUCCIÓN

La Autoridad Nacional del Agua (2020) indica que la cuenca del río Moche se ubica en la costa norte del Perú, en la vertiente del Pacífico. Esta cuenca presenta un área de drenaje de 2,115.411 km² y una longitud de 109.87 km. Se encuentra influenciada por descargas provenientes de actividades mineras, industriales y poblacionales, las cuales afectan la calidad del agua, impactando negativamente los ecosistemas acuáticos, los cultivos y la salud de las personas que consumen esta fuente de agua.

Los pasivos ambientales mineros que impactan el río Moche repercuten en la calidad del agua, como se evidencia en los reportes de monitoreo de los años 2019, 2020 y 2022, realizados por la Autoridad Nacional del Agua. Estos reportes, que incluyen evaluaciones periódicas de este cuerpo de agua, registran excedencias en los niveles de metales pesados respecto a los valores de referencia establecidos en la legislación ambiental vigente.

Huaranga (2012) estableció estaciones de monitoreo en la cuenca alta, media y baja del río Moche, donde evidenció que las concentraciones de Fe, Pb, Cd, Cu, Zn y As (mg/L) en sus aguas reflejan una clara contaminación por metales pesados.

La presente investigación muestra el grado de contaminación por metales pesados en las aguas de la cuenca alta del río Moche y propone medidas de solución. En la zona de estudio, se ha identificado la existencia de pasivos ambientales mineros y minería informal. Según el informe de estimación del riesgo por peligro inminente ante la contaminación de las aguas superficiales del río Moche, publicado por el Gobierno Regional de La Libertad en diciembre de 2020, se evidencia la carencia de investigaciones actuales específicas sobre la presencia de contaminantes en el agua superficial del río Moche. Estas investigaciones son esenciales para establecer un criterio sobre el estado situacional actual del cuerpo de agua y tomar decisiones para su remediación.

II. MÉTODOS

En la parte experimental, se realizó la toma de muestras y mediciones directas en campo utilizando equipos portátiles, como el multiparámetro PCTS Test 50 y un equipo portátil de filtrado (Millipore). La recolección de muestras de agua para análisis químicos en laboratorio se llevó a cabo en frascos de HDPE de 250 ml, previamente lavados con ácido nítrico al 10% y enjuagados con agua del punto de muestreo. Para el análisis de concentraciones totales y disueltas, se tomaron muestras de agua sin filtrar, las cuales se conservaron con HNO₃ hasta alcanzar un pH <2 y se refrigeraron a 4 °C para su transporte desde el campo hasta los laboratorios, siguiendo los estándares de muestreo de laboratorios reconocidos.

Materiales

8 frascos de vidrio de 250 ml, ácido nítrico como preservante, jarra milimetrada, cooler y guantes de nitrilo.

Equipos

Equipo multiparámetro PCTS Testr 50 marca OAKTON. Los análisis de metales pesados y metales disueltos se realizaron en un laboratorio acreditado.

Unidad de análisis

La unidad de análisis es la cuenca alta del río Moche, donde se analizó la concentración de metales en muestras de agua de zonas con presencia de pasivos ambientales mineros.

Población de estudio

La población de estudio son los afluentes de la cuenca alta del río Moche, ubicados en el caserío de Milluachaqui, distrito de Salpo, provincia de Otuzco, departamento de La Libertad. Se tomó la muestra de agua y se analizaron metales, comparando los resultados con los estándares de calidad ambiental de agua - Categoría 3 (D.S. N.º 004-2017-MINAM).

Tamaño de muestra

Los resultados del monitoreo de calidad de agua corresponden a los puntos de monitoreo PS-01, PS-02, PS-03 y PS-04 (ver Figura 1). Además, se consideraron las estaciones QADull, RChan1 y RMoch12, que son monitoreadas anualmente por la Autoridad Nacional del Agua. Los puntos de monitoreo están ubicados aguas arriba, cerca de la zona de vertimiento, y aguas abajo de los pasivos ambientales mineros identificados como ID 846, 13113 y 13114.

Muestreo en campo

Se utilizó la técnica de monitoreo de calidad de agua y análisis de laboratorio; donde se recolectó una muestra de agua siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua. Los parámetros fisicoquímicos analizados en campo fueron conductividad, pH, sólidos totales disueltos y temperatura (ver Figura 2).

En la visita de campo, se identificó que en la ubicación de los pasivos ambientales mineros identificados con ID 13113, ID 13114 e ID 846, actualmente se encuentran realizando actividades extractivas polimetálicas por pequeños mineros, que aún no aplican medidas de manejo ambiental sobre el proceso extractivo (ver Figura 3).

Análisis de laboratorio

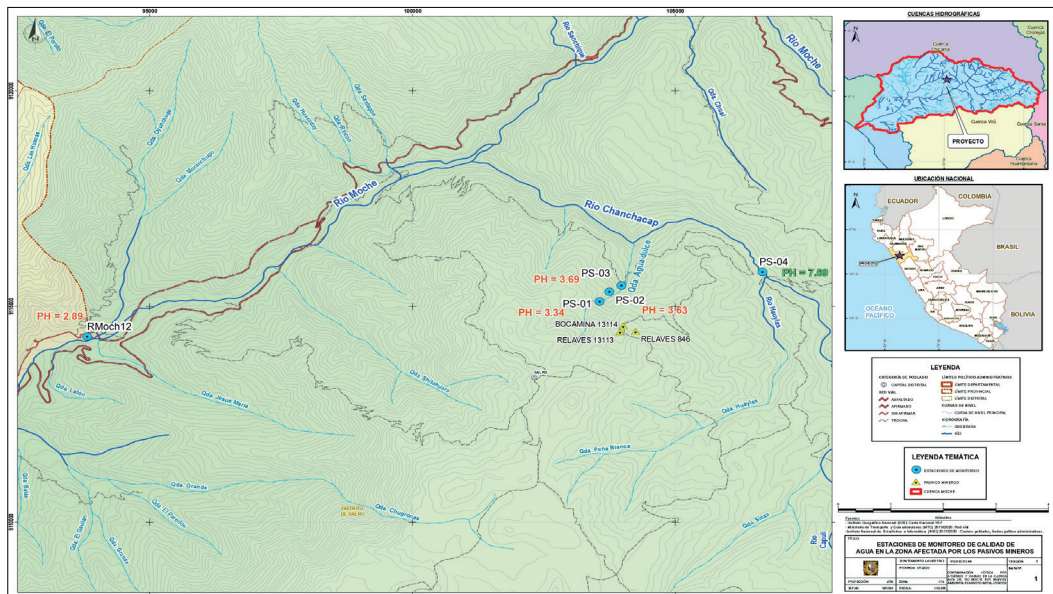
Los parámetros de metales totales y metales disueltos en las muestras de agua fueron analizados por un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Trabajo en gabinete

A través de la técnica de revisión documental, se revisaron los monitoreos anuales de la Autoridad Nacional del Agua, a partir de cuyos resultados se elaboró un cuadro comparativo. Asimismo, con los resultados obtenidos en los monitoreos de calidad de agua, se elaboraron cuadros y gráficos que permiten analizar el estado situacional del cuerpo de agua.

Figura 1

Mapa de los puntos de monitoreo de calidad de agua en la cuenca alta del río Moche

**Figura 2**

Medición de parámetros fisicoquímicos con el multiparámetro PCTS Testr 50 marca OAKTON en el punto PS-01

**Figura 3**

Lugar de ubicación de los pasivos ambientales mineros



III. RESULTADOS

Para determinar la calidad del agua, tanto aguas arriba como aguas abajo de la zona de descarga de los pasivos ambientales mineros (PAM), se utilizaron los resultados del monitoreo de calidad de agua realizado en el desarrollo de la presente investigación, así como los resultados de los monitoreos participativos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

3.1. Estaciones de la Autoridad Nacional del Agua

Cerca de los pasivos ambientales mineros identificados con los ID 846, 13113 y 13114 se encuentra la quebrada Agua Dulce, donde se ubica la estación de monitoreo QADul1 de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). En esta estación, la ANA realiza el "Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Moche" con una frecuencia anual, durante los años 2019, 2020 y 2022.

Aguas arriba de los pasivos ambientales en la zona de Milluachaqui se encuentra la estación de monitoreo de la ANA denominada RChan1, ubicada sobre el río Chanchacap.

Quebrada Agua Dulce

En base a los resultados de los monitoreos de calidad de agua emitidos por la Autoridad Nacional del Agua, se tiene el siguiente panorama:

La estación QADul1 es un punto de monitoreo de la calidad de agua de la Autoridad Nacional del Agua, afectado por los drenajes ácidos de mina provenientes de labores abandonadas y activas ubicadas en el distrito de Salpo y el caserío de Milluachaqui, los cuales discurren hacia la quebrada Agua Dulce, un afluente del río Chanchacap. Los resultados del monitoreo en la estación QADul1 exceden los estándares de calidad de agua (ECA), que se emplean como parámetros de referencia en la presente tesis.

Río Chanchacap

La estación RChan1, ubicada sobre el río Chanchacap, es un punto de monitoreo de la calidad de agua de la ANA, situado aguas arriba de los pasivos ambientales mineros ID 846, 13113 y 13114, donde no se registran impactos negativos en la calidad de agua por actividades extractivas. El río Chanchacap es un afluente del río Moche. En la Tabla 4 se puede observar que los resultados de los parámetros monitoreados en la estación RChan1 se encuentran dentro de los estándares de calidad de agua (ECA).

Río Moche

La estación RMoch12, ubicada en el centro poblado de Samne, es un punto de monitoreo de la calidad de agua de la ANA, situado aguas abajo del vertimiento de los drenajes ácidos de la zona de estudio. Los resultados de los análisis de metales pesados, como aluminio, cadmio, cobalto, cobre, hierro, manganeso, plomo y zinc, exceden los estándares de calidad de agua, registrándose además un pH extremadamente ácido.

3.2. Estaciones de monitoreo realizadas durante la visita de campo

Durante la visita de campo a los pasivos ambientales mineros del distrito de Salpo, realizada el 18 de setiembre de 2022, se establecieron las siguientes estaciones de monitoreo en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1
Listado de estaciones de monitoreo de agua

Código	Detalle	Coordenadas Geográficas	
		Este	Norte
PS-01	Aguas arriba de la descarga de aguas ácidas de los PAM	0765103	9116074
PS-02	En la zona de descarga de aguas ácidas de los PAM coincide con QADul1.	0765291	9116295
PS-03	Aguas abajo de la descarga de aguas ácidas de los PAM	0765521	9116438
PS-04	Aguas arriba de la descarga de la quebrada Agua Dulce al río Chanchacap. Coincide con RChan1.	0768205	9116710

A través del equipo multiparámetro PCTS Testr 50, marca OAKTON, se tomaron in situ los datos de campo (temperatura, conductividad, pH y sólidos totales disueltos). Además, se recogieron muestras de agua en frascos esterilizados para analizar metales totales y disueltos en un laboratorio acreditado. En la Tabla 2 y 3, se presentan los resultados obtenidos:

IV. DISCUSIÓN

Los valores de pH en la mayoría de las estaciones son ácidos, excepto en las ubicadas en RChan1 y PS-04, situadas en el río Chanchacap, cuyos valores están dentro del estándar de calidad de agua (ECA) para la categoría 3 - D1 (riego de vegetales). Durante los años 2019, 2020 y 2022, los valores de pH en las estaciones QADul1 y RMoch12 se encuentran por debajo del rango establecido por el ECA para agua, a diferencia de RChan1.

Los valores bajos de pH en el agua favorecen la disolución de metales pesados, los cuales estarán presentes en los cuerpos de agua cercanos a los drenajes ácidos de minería. Los drenajes ácidos provenientes de los pasivos ambientales mineros N° 846, 13113 y 13114 afectan la calidad del agua en su entorno, y el problema se agrava con los drenajes de las actividades de minería artesanal situadas en la cabecera de la quebrada Agua Dulce (ver Figura 4).

Los resultados del monitoreo exceden los valores de metales pesados establecidos en el estándar de calidad de agua (D.S. N.º 004-2017-MINAM). En cuanto al pH, se observó que en las estaciones ubicadas en el río Chanchacap los valores se encuentran dentro de los límites establecidos por el ECA. Sin embargo, en las demás estaciones aguas abajo, los valores de pH son menores a 4, lo que indica el estado crítico del río Moche.

Tabla 2

Resultados de los monitoreos de calidad de agua, elaborados por la Autoridad Nacional del Agua

ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA												
Departamento: La Libertad Provincia: Otuzco Distrito: Salpo				ESTACIONES DE MONITOREO								
				RChan1			QADul1			RMoch12		
Nombre del cuerpo de agua				Rio Chanchacap			Quebrada Agua Dulce			Rio Moche		
Ubicación de estación de monitoreo				Aguas arriba del vertimiento			Aguas abajo del vertimiento			Aguas abajo del vertimiento		
Fecha de monitoreo				18/06/2019	28/02/2020	11/10/2022	18/06/2019	28/02/2020	11/10/2022	18/06/2019	28/02/2020	11/10/2022
Hora de monitoreo				15:00	12:30	10:30	15:00	12:30	10:30	15:00	12:30	10:30
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS	UNIDAD	Estándar de Calidad de Agua (ECA) Categ. 3		RESULTADOS DE MONITOREO								
		Vegetal	Animales									
Conductividad	(µS/cm)	<=2500	<=5000	286.5	325.00	413.00	2.63	2.88	3.50	642.20	887.00	1414.00
pH	Unidad de pH	6,5-8,5	6,5-8,4	7.90	8.03	7.78	3.26	2.3	3.40	2.40	2.20	2.89
Temperatura	°C	----	----	12.430	16.00	12.90	20.69	14.28	11.20	19.70	20.30	18.80
INORGÁNICOS				Metales Totales								
Aluminio	mg/L	<=5	<=5	0.111	0.117	0.093	23.660	29.080	60.940	4.56	6.83	16.33
Arsénico	mg/L	<=0.1	<=0.2	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.005	0.22	0.38	1.38
Cadmio	mg/L	<=0.01	<=0.05	0.00001	0.004	0.002	2.147	1.508	3.108	0.05	0.05	0.079
Cobalto	mg/L	<=0.05	<=1	0.00001	0.0002	0.0003	0.159	0.216	0.396	0.01	0.01	0.023
Cobre	mg/L	<=0.2	<=0.5	0.0006	0.004	0.021	19.600	10.310	55.849	2.33	3.51	8.978
Hierro	mg/L	<=5	---	0.2993	0.239	0.076	0.468	11.970	1.795	22.43	37.11	154.15
Manganeso	mg/L	<=0.2	<=0.2	0.0518	0.083	0.035	9.318	14.840	33.818	6.03	7.31	12.07
Plomo	mg/L	<=0.05	<=0.05	0.0002	0.001	0.001	0.704	0.519	0.973	1.29	0.07	0.05
Zinc	mg/L	<=2	<=24	0.0100	0.047	0.268	94.350	180.000	731.576	7.57	9.98	14.96

Nota: Números de color rojo exceden los ECA.

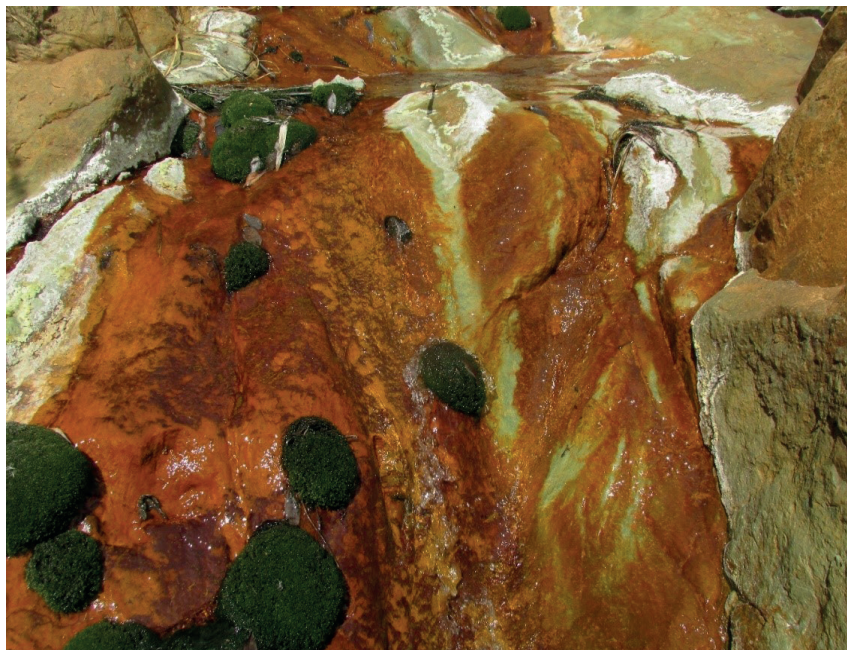
Tabla 3

Resultados de análisis de calidad de agua en las estaciones PS-01, PS-02, PS-03, PS-04 y RMoch12

ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA												
Departamento: La Libertad Provincia: Otuzco Distrito: Salpo				ESTACIONES DE MONITOREO								
				PS-04		PS-01		PS-02		PS-03		RMoch12
Nombre del cuerpo de agua				Río Chanchacap		Quebrada Agua Dulce		Quebrada Agua Dulce		Quebrada Agua Dulce		Río Moche
Ubicación de estación de monitoreo				Aguas arriba del vertimiento Coincide con RChan1		En el punto de vertimiento Coincide con QADul1		Aguas abajo del vertimiento		Aguas abajo del vertimiento		Aguas abajo del vertimiento
Fecha de monitoreo				18/09/2022		18/09/2022		18/09/2022		18/09/2022		11/10/2022
Hora de monitoreo				18:00		11:30		15:35		16:34		10:30
PARÁMETROS	UNIDAD	Estándar de calidad de agua (ECA) Categ. 3		RESULTADOS DE MONITOREO								
		Vegetal	Animales									
FISICOQUÍMICOS												
Conductividad	(µS/cm)	<=2500	<=5000	452		6.2		4.09		4.13		1414
pH	Unidad de pH	6,5-8,5	6,5-8,4	7.69		3.34		3.63		3.69		2.89
Sólidos totales Disueltos	mg/L	----	----	326		4.39		2.9		2.92		-
Temperatura	°C	----	----	15.3		22.9		15.6		16.9		18.8
INORGÁNICOS				Metales Totales	Metales Disueltos	Metales Totales	Metales Disueltos	Metales Totales	Metales Disueltos	Metales Totales	Metales Disueltos	Metales Totales
Aluminio	mg/L	<=5	<=5	0.15	0.14	94.04	88.89	62.47	60.07	70.48	67.26	16.33
Arsénico	mg/L	<=0.1	<=0.2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	1.38
Cadmio	mg/L	<=0.01	<=0.05	<0.0002	<0.00020	4.32	3.97	2.99	2.68	3.43	3.18	0.079
Cobalto	mg/L	<=0.05	<=1	<0.002	<0.002	0.62	0.59	0.45	0.40	0.46	0.44	0.02
Cobre	mg/L	<=0.2	<=0.5	0.02	0.02	43.86	42.24	28.83	27.73	31.58	30.64	8.97
Hierro	mg/L	<=5	---	0.16	0.14	17.45	17.42	5.89	5.17	3.124	3.068	154.15
Manganeso	mg/L	<=0.2	<=0.2	0.03	0.03	34.78	31.68	26.31	23.61	32.16	30.74	12.07
Plomo	mg/L	<=0.05	<=0.05	<0.0010	<0.0010	0.77	0.70	0.83	0.71	1.26	1.21	0.05
Zinc	mg/L	<=2	<=24	0.23	0.19	114.47	105.38	100.49	93.02	109.50	105.24	14.96

Figura 4

Agua de las quebradas de la zona de estudio, afectadas por drenajes ácidos



Estos minerales, como los sulfatos e hidroxisulfatos de Fe con Al, Zn, Cu, Cd y otros, conocidos como minerales generadores de acidez (MGA), acumulan acidez disponible durante los períodos secos para liberarla bruscamente cuando sube el nivel del agua (en períodos de lluvia o invierno). Ante un aumento en el caudal, estos minerales altamente solubles se disuelven rápidamente y son arrastrados aguas abajo, liberando de inmediato la acidez acumulada al sistema o al medio. (Aduvire, 2006, p.51).

El río Chanchacap se encuentra aguas arriba de las descargas de agua ácida, lo que explica por qué sus valores de metales pesados están dentro del estándar de calidad de agua (ECA). En contraste, la quebrada Agua Dulce presenta valores de metales pesados que exceden el ECA, debido a la proximidad de pasivos ambientales mineros y actividades mineras informales cerca del punto de monitoreo.

En el río Moche, confluyen efluentes de diversas actividades antropogénicas, y se observa que el nivel de metales pesados supera el ECA, evidenciando el estado crítico de la calidad del agua en la cuenca del río Moche.

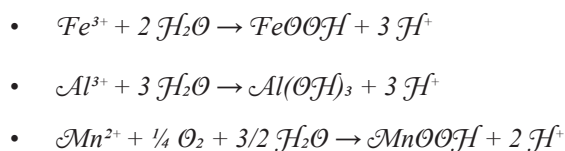
4.1. Propuesta de remediación de los efluentes que proceden de los pasivos ambientales mineros

Las antiguas labores mineras subterráneas, actualmente en abandono y denominadas pasivos ambientales mineros, contienen sulfuros que, al entrar en contacto con el oxígeno atmosférico y el agua, inician complejos procesos de transformación física, química y biológica. Estos procesos originan efluentes generalmente ácidos (con bajo pH) y con elevadas concentraciones de metales y sulfatos. Dichos efluentes constituyen importantes fuentes de contaminación y pueden causar alteraciones significativas

al medioambiente, principalmente modificando la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del entorno (Dhiwar et al., 2021; Aduvire, 2006).

Una alternativa para la remediación de los efluentes ácidos descargados por los pasivos ambientales mineros, como los identificados en los puntos PS-02, PS-03 y PS-04, es aplicar sistemas de tratamiento de bajo costo, como los sistemas de tratamiento pasivos. Estos sistemas se dimensionan teniendo en cuenta la acidez total.

La caracterización hidroquímica de los drenajes de los pasivos ambientales mineros incluye la acidez protónica debido a los iones hidrógeno libres (H^+) y la acidez mineral originada por la disolución de metales como Fe, Al, Mn y otros (Aduvire, 2023). Estos metales son considerados generadores de acidez porque, mediante oxidación e hidrólisis, pueden generar H^+ , según las siguientes reacciones:



La filosofía general de los sistemas de tratamiento pasivos se basa en procesos físicos, químicos y biológicos que ayudan a modificar las condiciones de Eh y pH de las aguas ácidas, favoreciendo la formación de especies insolubles que precipitan como oxihidróxidos metálicos. Generalmente, estos sistemas emplean material alcalino para neutralizar la acidez, así como vegetación y/o microorganismos. Las bacterias, en particular, catalizan las reacciones y aceleran los procesos que forman precipitados de baja solubilidad.

Entre los métodos de tratamiento propuestos en este estudio se encuentran los humedales anaerobios (Wetlands anaerobios) y los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems). Como efluente a remediar se ha elegido la descarga que procede de la galería o túnel PS-02 (2022), que también coincide con el punto de monitoreo del ANA QADul-1 (2019, 2020, 2022).

Para el dimensionamiento del sistema de tratamiento pasivo (wetland anaerobio o SAPS), es necesario convertir la acidez total en función del pH y la acidez generada por la carga metálica presente en el efluente PS-02 (Tabla 4), mediante la siguiente expresión:

$$\text{Acidez} = 50 (3\text{Fe}^{3+} / 56 + 3\text{Al}^{3+} / 27 + 2\text{Mn}^{2+} / 55 + 2\text{Cu}^{2+} / 65 + 2\text{Zn}^{2+} / 64) + 1000 * 10^{\text{pH}}$$

Reemplazando datos de la Tabla 4 se obtiene la acidez teórica total:

$$\text{Acidez teórica total} = 623.76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de } \text{CaCO}_3 \text{ equivalente}$$

• Wetland anaerobio para tratar el drenaje del pasivo ambiental minero PS-02

En el wetland anaerobio intervienen diversos procesos mediados por microorganismos que catalizan las reacciones de oxidación e hidrólisis, además de la reducción bacteriana del sulfato. Para ello, generalmente se emplea una combinación de sustratos orgánicos y materiales alcalinos, como se observa en la Figura 5. En el caso de los humedales (wetlands), también se incluyen plantas de rápido crecimiento adaptadas a medios ácidos (Lopez, Aduvire y Barettino, 2002).

El uso de vegetación palustre emergente en los humedales no solo favorece una integración natural con el entorno, sino que también ofrece ventajas adicionales, tales como:

- Las plantas ayudan a controlar la conductividad hidráulica del dispositivo. El crecimiento de raíces forma un sustrato poroso e incrementa la circulación del agua en la rizosfera.
- La vegetación elimina algunos nutrientes por asimilación, intercambio iónico y adsorción.
- Las raíces emergentes introducen oxígeno al medio, creando una zona oxigenada en la rizosfera que

favorece procesos de oxidación y la formación de fases sólidas que precipitan y se depositan en el fondo o son arrastradas por el agua.

- Las plantas viejas y muertas favorecen la formación de materia orgánica en el dispositivo, lo que intensifica la actividad bacteriana e incrementa la eficacia del tratamiento biológico.
- Los tallos y las hojas de las plantas diversifican los flujos que atraviesan los wetlands y evitan la formación de vías preferenciales.

En los wetlands anaerobios, las reacciones de reducción son los mecanismos dominantes en la remoción de metales. La reducción bacteriana del sulfato neutraliza la acidez protónica dentro del humedal. Los humedales anaerobios, al generar alcalinidad, son adecuados para tratar drenajes de mina con $\text{pH} < 4,5$. Entre las plantas más utilizadas destacan la Typha y el Sphagnum debido a su alta tolerancia a medios ácidos; un efecto similar se obtiene con las totoras (Schoenoplectus californicus).

Para el dimensionamiento del wetland anaerobio para tratar el drenaje del PS-02 desde el punto de vista químico, se puede considerar una eliminación de la acidez por unidad de superficie y día, con un valor que oscila entre 3,5 y 8 $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ (Hedin et al., 1994; Watzlaf, 1997).

La superficie mínima del wetland anaerobio se determina en función de la carga de acidez y la capacidad de eliminación de acidez:

$$\text{Carga de acidez diaria} = \text{Caudal} \times \text{Acidez} \times 1,44 = 21,359.52 \text{ g/día}$$

$$\text{Superficie} = \text{Carga de acidez diaria} / \text{Eliminación de acidez} = 21,359.52 \text{ g/día} / 7 \text{ g/m}^2 = 3,051.36 \text{ m}^2$$

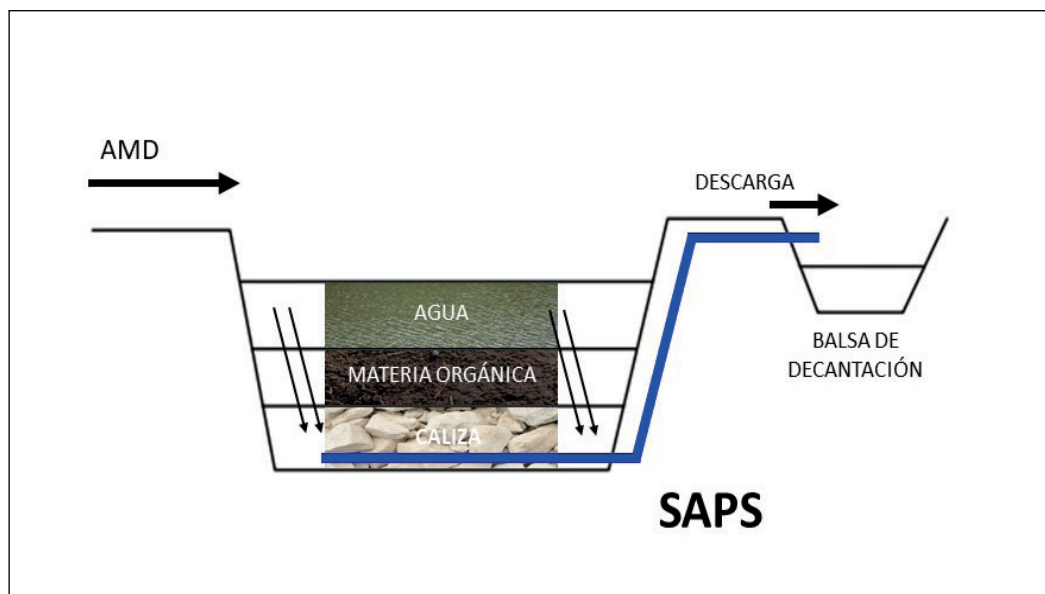
• SAPS para tratar el drenaje del pasivo ambiental minero PS-02

Los sistemas de generación sucesiva de alcalinidad (SAPS) operan en permanente inundación, con el agua fluyendo por gravedad a través de un sustrato orgánico y otro de material alcalino. El incremento del pH hasta niveles cercanos al neutro se debe a la alcalinidad de los bicarbonatos generados en el sistema a partir de la reducción anaeróbica del sulfato y la disolución de la caliza (CaCO_3). Para favorecer las condiciones anóxicas, deben funcionar con una altura de la lámina de agua superior a 60 cm. Esta lámina cubre un sustrato permeable de un espesor de 30-60 cm, compuesto mayoritariamente por material orgánico (70-90% de estiércol, compost, turba, heno, aserrín, etc.), dispuesto sobre una capa de caliza cuya disolución aporta alcalinidad al agua (Figura 5).

Tabla 4

Calidad de agua en la estación PS-02 como efluente tipo para el diseño

	Caudal	pH	Fe	Al	Mn	Cu	Zn	As
	Q (l/min)		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
ECA de Agua		6 - 9	5	5	0.2	0.2	2	0.1
PS-02 (QADul1)	23.8	3.6	5.9	62.5	26.3	28.8	100.5	0.0

Figura 5*Disposición de las capas y líneas del flujo en un SAPS*

Para optimizar la reducción del sulfato y el incremento del pH en el sistema, el agua que entra por la parte superior se embalsa para crear condiciones de anoxia en las capas inferiores. Luego, se fuerza un flujo vertical a través de las capas de materia orgánica y caliza, y finalmente se drena desde la base hacia una balsa de decantación o sedimentación para separar los precipitados.

Entre los principales aspectos a considerar en el diseño de un SAPS se encuentran: las características del agua a tratar, el área o superficie, la geometría del dispositivo, la profundidad de la celda de tratamiento, el tiempo de retención hidráulica, la composición de los sustratos, así como las condiciones hidrológicas del lugar, los cambios de temperatura y el clima.

Para el dimensionamiento de un SAPS se tiene en cuenta la carga de acidez y la acidez que es capaz de eliminar por metro cuadrado y día (30-50 gr /m².día), mediante la siguiente expresión:

$$\text{Superficie} = \frac{\text{Carga de acidez diaria (gr acidez/día)}}{\text{Eliminación de Acidez (gr /m}^2\text{.día)}} = \frac{21,359.52 \frac{\text{g}}{\text{día}}}{50 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{día}}$$

$$\text{Superficie (Área)} = 427.19 \text{ m}^2$$

El uso de sistemas de tratamiento pasivo depende del caudal y la concentración de metales presentes en el efluente, lo que requiere una determinada área de terreno para implementar el sistema. Por esta razón, en función de la disponibilidad presupuestaria del organismo responsable, se puede considerar la opción de sistemas de tratamiento activo. Sin embargo, en el caso del efluente del pasivo ambiental minero de la estación PS-02 o similares, la remediación mediante un Sistema de Generación Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) es más viable, ya que requiere menos área en comparación con un wetland anaerobio.

V. CONCLUSIONES

Existe contaminación hídrica debido a la presencia de metales pesados, tales como aluminio, cadmio, cobalto, cobre, manganeso, plomo y zinc. Esta contaminación se refleja en los resultados de los monitoreos de calidad de agua realizados en la presente investigación.

- En las estaciones PS-01, PS-02 y PS-03 se han registrado valores de metales que exceden notablemente el estándar de calidad ambiental (ECA) para agua de categoría 3 (D.S. N° 004-2017-MINAM), con valores de aluminio (70.48 mg/L), cadmio (3.43 mg/L), cobalto (0.46 mg/L), cobre (31.58 mg/L), manganeso (32.16 mg/L), plomo (1.26 mg/L) y zinc (109.50 mg/L), además de valores de pH menores a 4. Esto evidencia el crítico estado de la cuenca alta del río Moche.
- Los drenajes ácidos de los pasivos ambientales mineros identificados con los ID 846, 13113 y 13114, así como de la minería informal, aportan altas concentraciones de metales pesados a los afluentes, como la quebrada Agua Dulce, del río Moche. Esta situación requiere una solución urgente mediante técnicas sostenibles para mejorar la calidad del agua.
- La aplicación de sistemas de tratamiento pasivo constituye una solución viable para la problemática generada por los drenajes de los pasivos ambientales mineros, debido a los reducidos caudales a tratar. Basado en las características de la calidad del agua de la quebrada Agua Dulce, se debe implementar un sistema de tratamiento, como el SAPS, para las descargas de drenajes ácidos que afectan las aguas de las quebradas circundantes.

VI. REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2023). *Aplicación de tratamientos pasivos en la remediación de efluentes de labores mineras abandonadas ubicadas a elevadas altitudes*. Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 8 (2), 13-20.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España. Ed. IGME. Madrid, España. Código: SID-63187. Publicación Electrónica 136pp. http://info.igme.es/sidpdf/113000/258/113258_0000001.pdf
- Autoridad Nacional del Agua. (2020). Resultados del monitoreo 2020 de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Moche. [Archivo PDF].
- Autoridad Nacional del Agua. (2020). Resultados del monitoreo 2019 de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Moche [Archivo PDF].
- Díaz, W. (2016). *Contaminación del ecosistema en San Mateo de Huanchor por los pasivos ambientales mineros metalúrgicos y su impacto en la salud de los pobladores [Tesis de Maestría]*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5045>
- Dhiwar, J. y Nair, S. (2021). *Treatment techniques of the acid mine water using the successive alkalinity producing system*. Journal of University of Shanghai for Science and Technology 23 (5) 618-624.
- Galván Usma, José Luis. (2016). *Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería*. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/7259>
- Hedin, R.S., Watzlaf, G.R. y Nairn, R.W. (1994). *Passive treatment of acid mine drainage with limestone*. Journal of Environmental Quality, 23 (6), 1338-1345. <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300060030x>
- López, E., Aduvire, O. y Baretino, D. (2002). *Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro*. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21. ISSN: 0366-0176. https://www.igme.es/Boletin/2002/113_1_2002/4-ARTICULO%20TRATAMIENTOS.pdf
- Skousen, J., Zipper, C., Rose, A., Ziemkiewicz, P., Nairn, R., McDonald, L. y Kleinmann, R. (2017). *Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment*. Mine Water Environment 36; 33-153.
- Walton-Day, K. y Mills, T. (2015). *Hydrogeochemical effects of a bulkhead in the Dinero mine tunnel, Sugar Loaf mining district, near Leadville, Colorado*. Applied Geochemistry 62 (2015) 61-74.
- Watzlaf, G. (1997). *Passive treatment acid mine drainage in down-flow limestone systems*. U.S. Department of Energy Technology Center, Pittsburgh, 233-244.

Contribución de autoría

Conceptualización: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Curación de datos: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Análisis formal: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Adquisición de fondos: Sarai Masako Malo Méndez; Investigación: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Metodología: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Administración del proyecto: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Recursos: Sarai Masako Malo Méndez; Software: Sarai Masako Malo Méndez; Supervisión: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Validación: Osvaldo Aduvire Pataca; Visualización: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Redacción - borrador original: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca; Redacción - revisión y edición: Sarai Masako Malo Méndez, Osvaldo Aduvire Pataca

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.