

Biofilters as an Eco-efficient Technology in the Removal of Iron and Copper from Acid Mine Drainage

Guevara Vásquez, Kelly Vitamar¹, Gutiérrez Martos, Hernan², Licapa-Redolfo, Gladys Sandi³
^{1,2,3}Facultad de Ingeniería; Universidad Privada del Norte; Perú, N00331145@upn.pe; N00304159 @upn.pe;
gladys.licapa@upn.edu.pe.

Abstract– This study evaluated the efficiency of iron and copper removal from acid mine drainage (AMD) using passive biofilters made of vegetable ash, dried guinea pig manure, and cattle manure. Real AMD samples with an initial pH between 2.70 and 2.72 and initial concentrations of 31.7 mg/L of Fe and 30.7 mg/L of Cu were tested using three biofilter configurations with different material proportions: Treatment 1 consisted of 20 g of guinea pig manure, 60 g of cattle manure, and 30 g of vegetable ash; Treatment 2 consisted of 15 g of guinea pig manure, 50 g of cattle manure, and 18 g of vegetable ash; and Treatment 3 consisted of 10 g of guinea pig manure, 40 g of cattle manure, and 16 g of vegetable ash. Contact times of 5, 10, and 15 min were evaluated, showing a rapid increase in pH to values between 7.2 and 8.9. Residual Fe and Cu concentrations were determined using a digital colorimeter and specific colorimetric kits. Treatment 3 showed the best overall performance, reaching a maximum removal of 89.84% for iron at 10 min and 97.85% for copper at 5 min. In contrast, formulations with higher ash content produced greater alkalinity but lower stability in metal retention. These results show that pH increase alone does not guarantee effective remediation and that organic matter plays a decisive role in metal immobilization. Therefore, the proposed system represents an eco-efficient and viable alternative for passive AMD treatment in rural contexts.

Keywords. Acid mine drainage, passive biofilters, iron, copper, pH neutralization, metal removal

Biofiltro como Tecnología Ecoeficiente para la Remoción de Hierro y Cobre de Drenaje Ácido de Mina

Guevara Vásquez, Kelly vitamar¹, Gutiérrez Martos, Hernan², Licapa-Redolfo, Gladys Sandi³
^{1,2,3}Facultad de Ingeniería; Universidad Privada del Norte; Perú, N00331145@upn.pe; N00304159 @upn.pe;
gladys.licapa@upn.edu.pe.

Resumen – El estudio evaluó la eficiencia de remoción de hierro y cobre presentes en drenaje ácido de mina (DAM) mediante biofiltros pasivos elaborados con ceniza vegetal, estiércol seco de cuy y estiércol vacuno. Se trabajó con muestras reales de DAM con pH inicial entre 2.70 y 2.72 y concentraciones iniciales de 31.7 mg/L de Fe y 30.7 mg/L de Cu. Se ensayaron tres configuraciones de biofiltros con diferentes proporciones de materiales: el Tratamiento 1 estuvo conformado por 20 g de estiércol de cuy, 60 g de estiércol vacuno y 30 g de ceniza vegetal; el Tratamiento 2, por 15 g de estiércol de cuy, 50 g de estiércol vacuno y 18 g de ceniza vegetal; y el Tratamiento 3, por 10 g de estiércol de cuy, 40 g de estiércol vacuno y 16 g de ceniza vegetal. Se evaluaron tiempos de contacto de 5, 10 y 15 min, observándose un incremento rápido del pH hasta valores comprendidos entre 7.2 y 8.9. Las concentraciones residuales de Fe y Cu se determinaron mediante un colorímetro digital con kits colorimétricos específicos. El Tratamiento 3 presentó el mejor desempeño global, con una remoción máxima de 89.84 % para hierro a los 10 min y de 97.85 % para cobre a los 5 min. En contraste, las formulaciones con mayor contenido de ceniza produjeron una mayor alcalinidad, pero una menor estabilidad en la retención de metales. Los resultados muestran que el incremento del pH por sí solo no garantiza una remediación efectiva y que la materia orgánica cumple un papel decisivo en la inmovilización metálica. En consecuencia, el sistema propuesto constituye una alternativa ecoeficiente y viable para el tratamiento pasivo de DAM en contextos rurales.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina, biofiltros pasivos, hierro, cobre, neutralización de pH, remoción de metales.

I. INTRODUCCIÓN

La actividad minera ha desempeñado un rol fundamental en el desarrollo económico del Perú, particularmente en regiones altoandinas como Cajamarca, donde la explotación de yacimientos metálicos ha sido una actividad histórica. No obstante, el desarrollo de esta actividad ha generado impactos ambientales significativos, especialmente asociados a la generación de pasivos ambientales mineros. Entre estos impactos, el drenaje ácido de mina (DAM) constituye uno de los problemas ambientales más complejos y persistentes, debido a su elevada acidez, su carácter corrosivo y su

capacidad para movilizar metales pesados hacia el entorno natural.

El drenaje ácido de mina (DAM) constituye uno de los principales problemas ambientales asociados a la actividad minera, debido a su elevada acidez y contenido de metales pesados disueltos [1]. En el Perú, la minería cuprífera ha generado impactos significativos sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, afectando ecosistemas y poblaciones cercanas. Diversos estudios han demostrado que los metales como hierro y cobre son altamente móviles en condiciones ácidas, por lo que se requieren tecnologías eficientes para su remoción.

El drenaje ácido de mina se genera principalmente por la oxidación de minerales sulfurados, como la piritita (FeS_2), al entrar en contacto con el oxígeno y el agua [1], [2]. Este proceso da lugar a la formación de ácido sulfúrico, lo que provoca una disminución drástica del pH del agua y favorece la disolución de metales presentes en los residuos mineros. En condiciones de pH extremadamente bajo, generalmente inferiores a 3, los metales pesados se mantienen en forma soluble, incrementando su movilidad y su potencial de contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas [1].

Tradicionalmente, el tratamiento del drenaje ácido de mina se ha basado en tecnologías activas, como la neutralización química mediante la adición de cal viva, cal hidratada o carbonato de calcio [3]. Si bien estos métodos permiten elevar rápidamente el pH y precipitar metales, presentan importantes limitaciones, entre ellas altos costos operativos, necesidad de supervisión constante, consumo continuo de reactivos químicos y generación de grandes volúmenes de lodos secundarios que requieren una disposición final adecuada [2], [3]. Estas limitaciones dificultan su implementación en zonas rurales, comunidades altoandinas y áreas alejadas de los centros urbanos.

Ante esta problemática, en los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de tecnologías pasivas y ecoeficientes para el tratamiento del DAM, orientadas al uso de materiales locales, de bajo costo y con menor impacto ambiental [4], [5], [10]. En este contexto, los biofiltros pasivos se presentan como una alternativa sostenible, ya que integran procesos físicos, químicos y biológicos sin requerir un aporte energético significativo ni infraestructura compleja [5].

Los biofiltros pasivos elaborados con residuos orgánicos permiten aprovechar materiales disponibles localmente, promoviendo principios de economía circular y sostenibilidad ambiental. En el presente estudio, se construyeron combinando estiércol seco de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal, ajustando las proporciones según la capacidad de adsorción y neutralización de cada material. El estiércol animal aporta una elevada carga de materia orgánica, microorganismos y grupos funcionales (carboxilos, hidroxilos y fenólicos) capaces de interactuar con los metales disueltos mediante procesos de adsorción, complejación y bioprecipitación. Por su parte, la ceniza vegetal, rica en óxidos y carbonatos alcalinos, actúa como agente neutralizante, reaccionando con los protones presentes en el DAM y elevando el pH del sistema. La proporción utilizada se seleccionó con base en estudios previos que demostraron que la combinación de materia orgánica y agentes alcalinos maximiza la eficiencia de remoción de metales pesados en drenajes ácidos [18].

La liberación inicial de metales observada en algunas muestras puede explicarse por procesos de intercambio iónico y desorción, tal como se ha reportado en sistemas de microelectrólisis y reducción bacteriana [2]. Además, se ha demostrado que el hierro es altamente sensible a variaciones de pH, pudiendo redisolverse en medios excesivamente alcalinos [3]. En el contexto peruano, la actividad minera ha generado pasivos ambientales que demandan tecnologías de tratamiento sostenibles y de bajo costo.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia de biofiltros pasivos como tecnología ecoeficiente para la neutralización del pH y la remoción de hierro y cobre presentes en el drenaje ácido de mina, empleando diferentes formulaciones de materiales orgánicos y tiempos de contacto cortos. La investigación busca aportar evidencia técnica que respalde el uso de residuos orgánicos locales como una alternativa viable, sostenible y de bajo costo para la remediación ambiental de drenajes ácidos de mina en contextos rurales de la región Cajamarca.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y diseño experimental. Según Ordoñez [1], este tipo de estudio hace uso de la medición de variables mediante procedimientos sistemáticos, siendo experimental al someterse a pruebas de manipulación en laboratorio. Por lo tanto, se realizó mediante un diseño experimental, orientado a evaluar la eficiencia de biofiltros pasivos en la remediación del drenaje ácido de mina (DAM).

Este tipo de enfoque permite una comprensión empírica del comportamiento de los materiales seleccionados frente al DAM, con base en mediciones directas y controladas de variables críticas como pH y concentración de metales disueltos. Además, se estructura como una herramienta de base para el diseño de

tecnologías sostenibles, replicables y adaptadas a contextos rurales andinos de Cajamarca.

A. ÁREA DE ESTUDIO Y ORIGEN DE LAS MUESTRAS

El punto de muestreo se localizó en el caserío Alto Perú, ubicado en el kilómetro 50 de la carretera Yanacocha–Bambamarca, en la provincia de Hualgayoc, Cajamarca, una zona reconocida por su alta incidencia de pasivos ambientales mineros. En esta localidad se identificaron escorrentías activas de DAM provenientes de relaves y zonas de exposición de sulfuros metálicos sin tratamiento, como indica la Fig. 1 y la Tabla 1.



Fig. 1. Ubicación geográfica de la extracción de DAM.

TABLA I
COORDENADAS DEL PASIVO AMBIENTAL MINERO

Punto	Coordenadas UTM		
	Norte	Este	Altura
PM	9237847.819	763008.941	3785

B. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Las muestras de drenaje ácido de mina (DAM) fueron recolectadas cuidadosamente en frascos con un volumen total de 3 L. Durante el transporte, se conservaron en hieleras con una temperatura aproximada de 4 °C, asegurando que sus propiedades fisicoquímicas no se alteraran. El análisis se realizó en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte, donde se evaluaron parámetros clave como el pH y la concentración total de metales disueltos, enfocándose en hierro (Fe) y cobre (Cu) debido a su abundancia e impacto ambiental.

El pH inicial de las muestras se situó entre 2.7 y 2.72, lo que confirmó la acidez extrema del efluente. Asimismo, las concentraciones de metales fueron contrastadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente del Perú para aguas de categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), evidenciándose que varios valores iniciales superaban ampliamente los límites permisibles, reafirmando la urgencia de aplicar alternativas de tratamiento eficaces y sostenibles como los biofiltros propuestos en este estudio.



Fig. 2 Muestras del DAM.

C. SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES FILTRANTES

Los materiales utilizados como base para los biofiltros fueron seleccionados por sus propiedades adsorbentes, alcalinizantes y biológicamente activos, además de ser de fácil acceso local y representar un aprovechamiento de residuos orgánicos rurales, coherente con los principios de economía circular.

El empleo de materiales orgánicos como enmiendas para el tratamiento de DAM ha demostrado ser una alternativa viable, debido a su capacidad para elevar el pH y aportar sitios activos para la retención de metales [10].

TABLA II
SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE MATERIALES FILTRANTES

MATERIAL	PROCEDENCIA	PREPARACIÓN PREVIA AL USO
Estiércol seco de cuy	Huertos domésticos del caserío Alto Perú	Secado natural durante 5 a 7 días. Luego, trituración manual para homogenizar textura
Estiércol seco vacuno	Ganadería rural de la zona	Secado al aire libre más trituración
Ceniza vegetal	Cocinas rurales alimentadas por leña (madera local)	Tamizado fino para eliminar escorias no combustas. Selección de partículas alcalinas finas

Estos materiales presentan características que los hacen potencialmente eficientes para la remediación:

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES FILTRANTES

Material	Características relevantes
Estiércol seco de cuy	Altamente alcalino (pH 8.5–9.5), contiene microorganismos reductores naturales y >60% de materia orgánica.
Estiércol seco vacuno	pH moderadamente alcalino (7.5–8.5), rica composición en amonio y compuestos húmicos que forman complejos metálicos.
Ceniza vegetal	Extremadamente alcalina (pH 9–13), contiene óxidos metálicos (CaO, MgO, K ₂ O), carbonatos y silicatos que neutralizan protones (H ⁺).

D. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS BIOFILTROS EXPERIMENTALES

Para evaluar la capacidad de remoción del pH y metales pesados (Fe y Cu) del drenaje ácido de mina, se diseñaron tres biofiltros pasivos experimentales, utilizando combinaciones variables de estiércol seco de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal.

Como parte del proceso de construcción de los biofiltros pasivos, se diseñaron cápsulas de material filtrante utilizando medias panty de nylon, que actuaron como envoltura porosa y flexible, permitiendo el paso del efluente mientras contenían los materiales sólidos en su interior. Esta técnica artesanal demostró ser efectiva para mantener la integridad estructural del biofiltro durante el ensayo, evitando la fuga de partículas finas sin obstaculizar el flujo del DAM. En cada cápsula se colocaron proporciones específicas de estiércol seco de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal, según el diseño experimental establecido. La fotografía presentada en la Figura 3 muestra un conjunto de cápsulas listas para su uso, correspondientes a las combinaciones ensayadas. Esta forma de preparación permitió estandarizar la dosificación, facilitar la manipulación del material durante los ensayos y replicar condiciones homogéneas en cada tratamiento. Cada filtro fue montado en recipientes plásticos de 3 litros de capacidad, en los cuales se vertió 1 litro de drenaje ácido de mina (DAM).



Fig. 3. Preparación de biofiltros con materiales orgánicos encapsulados en malla nylon

E. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se establecieron tres tiempos de contacto para cada muestra: 5, 10 y 15 minutos. En cada intervalo, se recolectaron submuestras del efluente tratado con ayuda de una jeringa, como se aprecia en la Fig. 4. Las muestras del efluente tratado fueron destinadas a determinar el nuevo pH y las concentraciones residuales de hierro y cobre. El ensayo se repitió dos veces por muestra con el fin de contar con mediciones comparativas entre tratamientos. Las submuestras fueron preservadas con ácido nítrico (HNO₃) y almacenadas en refrigeración hasta su análisis. En total, se trabajó con submuestras correspondientes a los tres tratamientos y a los tres tiempos de contacto evaluados. Los resultados obtenidos permitieron calcular las eficiencias de remoción de los metales analizados.



Fig. 4. Muestreo de los tratamientos aplicados al drenaje ácido de mina



Fig. 5. Muestras para lectura de metales,

III. RESULTADOS

A. COMPORTAMIENTO DEL pH

En el análisis del pH se evaluó el comportamiento del drenaje ácido de mina con base en tres tiempos de contacto: 5, 10 y 15 minutos, aplicados a tres configuraciones diferentes de filtros pasivos construidos con materiales orgánicos locales, como estiércol de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal, mostradas en la Tabla V y la Fig. 6. Los resultados obtenidos evidencian un incremento progresivo del pH, condicionado por la composición del filtro y la duración del tratamiento.

TABLA V

ANÁLISIS DE PH CON DRENAJE ACIDO DE MINA A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO

Muestra	Materiales	Tiempo 5 min	Tiempo 10 min	Tiempo 15 min
Tratamiento 1	Estiércol de Cuy 20g Estiércol Vacuno 60g Ceniza Vegetal 30g	7.45	8.01	8.89
Tratamiento 2	Estiércol Vacuno 50g Ceniza Vegetal 18g Estiércol de Cuy 15g	7.35	7.45	7.9
Muestra 3	Ceniza Vegetal 16g Estiércol de Cuy 10g Estiércol Vacuno 40g	7.28	7.39	7.57

El tratamiento 1 presentó el mayor incremento de pH entre las formulaciones evaluadas, evidenciando una elevada capacidad neutralizante del drenaje ácido de mina. Partiendo de un pH inicial de 2.70–2.72, el sistema alcanzó un valor de 7.45 a los 5 minutos, incrementándose a 8.01 a los 10 minutos y llegando hasta 8.89 a los 15 minutos de tratamiento.

Este comportamiento se atribuye principalmente a la alta proporción de ceniza vegetal presente en la formulación, la cual contiene óxidos y carbonatos alcalinos capaces de reaccionar rápidamente con los protones del medio ácido. La combinación de estos compuestos con la materia orgánica del estiércol de cuy potencia el proceso de neutralización, generando un aumento acelerado del pH.

No obstante, el incremento pronunciado del pH observado en esta muestra indica una sobrealcalinización del sistema, alcanzando valores superiores al rango óptimo recomendado para usos agrícolas. Si bien esta formulación resulta altamente

TABLA IV

COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS CON DIFERENTES PROPORCIONES DE ESTIÉRCOL SECO DE CUY, ESTIÉRCOL VACUNO Y CENIZA VEGETAL

Muestra	Estiércol de cuy (g)	Estiércol de vacuno (g)	Ceniza vegetal (g)
Muestra 1	20	60	30
Muestra 2	15	50	18
Muestra 3	10	40	16

Como parte de la fase experimental del presente estudio, se realizó la determinación cuantitativa de los metales pesados disueltos, específicamente hierro (Fe) y cobre (Cu), empleando un método colorimétrico con el uso de un colorímetro digital y kits colorimétricos específicos para cada metal. Esta metodología fue seleccionada por su confiabilidad, rapidez, precisión y aplicabilidad en estudios ambientales desarrollados en laboratorios con infraestructura básica, alineándose con el enfoque ecoeficiente de la investigación.

E.1. Procedimiento Experimental

Previo al análisis, todas las muestras fueron filtradas para eliminar partículas sólidas en suspensión que pudieran interferir con la lectura óptica del colorímetro. Posteriormente, se adicionaron los reactivos colorimétricos específicos para hierro y cobre, siguiendo estrictamente las instrucciones del fabricante y respetando los volúmenes de reactivo, los tiempos de reacción y las condiciones de lectura establecidas.

Los valores obtenidos fueron registrados sistemáticamente y organizados en tablas de resultados, permitiendo la comparación entre muestras tratadas y no tratadas, así como el análisis de la eficiencia de remoción de hierro y cobre en función del tipo de biofiltro y del tiempo de contacto. La utilización de duplicados analíticos reforzó la confiabilidad del procedimiento experimental y permitió sustentar la validez de los datos obtenidos.

efectiva para neutralizar la acidez extrema del DAM, niveles elevados de alcalinidad pueden generar efectos adversos, como la salinización del suelo o el bloqueo de la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales en suelos sensibles. Por ello, esta muestra representa un sistema eficiente desde el punto de vista de neutralización, pero con limitaciones en términos de estabilidad química y aplicabilidad ambiental directa.

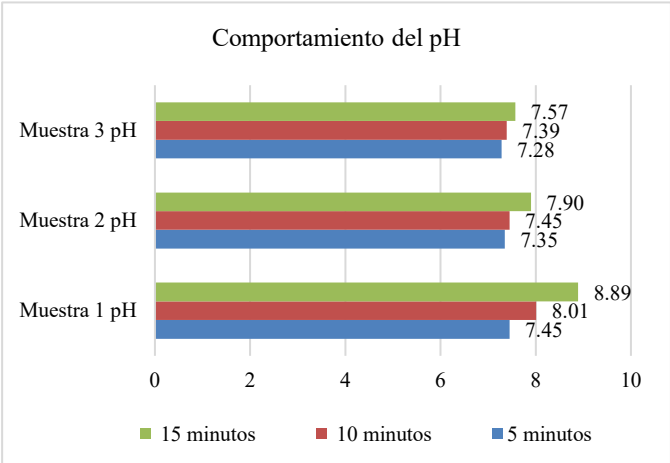


Fig.6. Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos

El tratamiento 2 mostró un comportamiento más gradual y controlado del pH en función del tiempo de contacto. Desde un pH inicial de 2.70–2.72, el valor se incrementó hasta 7.35 a los 5 minutos, alcanzó 7.45 a los 10 minutos y llegó a 7.90 a los 15 minutos de tratamiento.

Este patrón sugiere un adecuado equilibrio entre la alcalinidad aportada por la ceniza vegetal y la capacidad amortiguadora de la materia orgánica presente en el estiércol vacuno, lo que favorece la estabilidad del sistema de tratamiento. A diferencia del tratamiento 1, el incremento del pH en el tratamiento 2 se produjo de manera progresiva, evitando variaciones bruscas y generando un medio químicamente más controlado y estable. Los valores de pH alcanzados en esta formulación se mantuvieron dentro de un rango cercano a la neutralidad y ligeramente alcalino, condición que resulta favorable tanto para la remoción de metales como para una eventual disposición ambiental del efluente tratado. En este sentido, el tratamiento 2 presenta una mayor compatibilidad con criterios de sostenibilidad, al lograr una reducción efectiva de la acidez del drenaje ácido de mina sin inducir procesos de sobrealcalinización que puedan afectar negativamente el equilibrio geoquímico del sistema.

El tratamiento 3 presentó el comportamiento más estable y amortiguado entre las formulaciones evaluadas. El pH se incrementó desde valores iniciales de 2.70–2.72 hasta 7.28 a los 5 minutos, 7.39 a los 10 minutos y 7.57 a los 15 minutos de tratamiento.

Este incremento progresivo y moderado del pH se asocia a la mayor proporción de estiércol de cuy y a una menor cantidad de ceniza vegetal, lo que favorece un efecto amortiguador debido a la elevada carga de materia orgánica. Este tipo de

comportamiento permite una neutralización controlada del DAM, evitando cambios bruscos en la química del sistema.

El incremento del pH observado en los tres tratamientos evaluados se atribuye principalmente a la presencia de ceniza vegetal, material rico en óxidos y carbonatos de calcio, potasio y magnesio, los cuales generan una neutralización inmediata del drenaje ácido de mina mediante reacciones de hidrólisis y precipitación [6]. Ello demuestra la efectividad de los filtros pasivos, principalmente gracias a la combinación de materiales orgánicos, como el estiércol, que aportan microorganismos y materia reductora, junto con la ceniza vegetal, altamente alcalina. La diferencia entre las muestras evidencia que una mayor proporción de ceniza induce una neutralización más rápida.

De este modo, los resultados apoyan lo sugerido por Bardales y Vilcazán [5], quienes recomiendan el uso de materiales orgánicos combinados con agentes alcalinos y microorganismos reductores para mejorar el pH en efluentes ácidos. Sin embargo, se destaca que el uso de materiales locales, como el estiércol de cuy y la ceniza vegetal, puede alcanzar niveles óptimos de tratamiento sin requerir tecnología compleja, favoreciendo la replicabilidad del método en contextos rurales. Estos resultados confirman que un incremento controlado del pH es más favorable para la remoción simultánea de hierro y cobre, así como para la sostenibilidad ambiental del sistema de tratamiento.

B. Análisis de metales pesados (Fe y Cu)

Como parte de la evaluación de la calidad del drenaje ácido de mina (DAM) tratado mediante biofiltros pasivos, se realizó el análisis cuantitativo de los metales pesados hierro (Fe) y cobre (Cu), considerados elementos representativos por su alta movilidad y toxicidad en ambientes ácidos. La determinación de estos metales se llevó a cabo mediante un método colorimétrico, empleando un colorímetro digital y kits colorimétricos específicos para cada metal, metodología ampliamente utilizada en estudios ambientales por su confiabilidad y facilidad de aplicación.

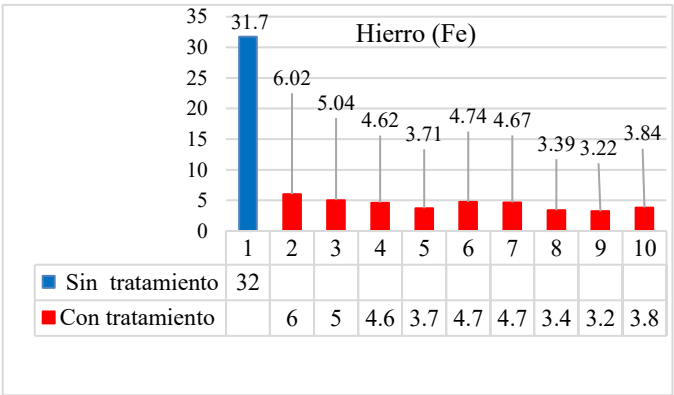


Fig. 7. Concentración de hierro en el drenaje ácido de mina durante los tratamientos.

La Figura 7 presenta la variación de la concentración de hierro (Fe) antes y después del tratamiento con biofiltros pasivos. La concentración inicial de hierro en el drenaje ácido de mina fue de 31.7 mg/L. En el Tratamiento 1 se observó una disminución progresiva de la concentración de hierro, pasando de 6.02 mg/L a los 5 minutos a 5.04 mg/L a los 10 minutos y 4.62 mg/L a los 15 minutos, lo que evidencia una remoción sostenida del metal durante el tiempo de contacto.

En el tratamiento 2, las concentraciones de hierro se mantuvieron entre 3.71 mg/L y 4.74 mg/L, sin mostrar una tendencia tan estable como la observada en el Tratamiento 1. Este comportamiento indica que la proporción de materiales orgánicos y ceniza vegetal permitió una remoción importante del hierro, aunque con menor estabilidad en comparación con otras formulaciones evaluadas. Por su parte, el tratamiento 3 mostró el comportamiento más estable, con concentraciones de 3.39 mg/L a los 5 minutos, 3.22 mg/L a los 10 minutos y 3.84 mg/L a los 15 minutos, registrando los menores valores residuales de hierro y el mejor desempeño global para este metal. En términos generales, la remoción de hierro estuvo influenciada por el equilibrio químico del sistema, el incremento del pH y la composición del material filtrante.

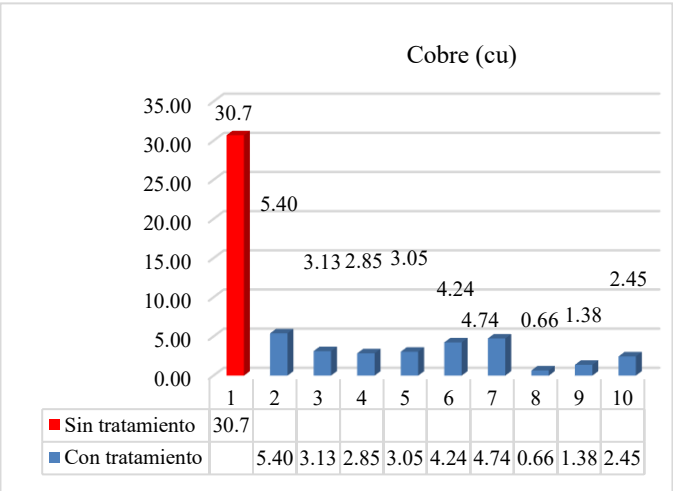


Fig 8. Variación de cobre en el drenaje ácido de mina durante los tratamientos

La Figura 8 muestra la variación de la concentración de cobre (Cu) antes y después del tratamiento con biofiltros pasivos. La concentración inicial de cobre en el drenaje ácido de mina fue de 30.7 mg/L. En el Tratamiento 1 se observó una disminución progresiva del cobre, alcanzando valores menores que la concentración inicial a los 15 minutos, lo que indica el desarrollo de procesos de adsorción del metal en la matriz del biofiltro. En el Tratamiento 2, las concentraciones de cobre aumentaron con el tiempo, sugiriendo una menor afinidad del sistema por este metal bajo dicha formulación y posibles procesos de liberación del cobre desde el material orgánico.

El tratamiento 3 presentó la mayor eficiencia de remoción de cobre, alcanzando una reducción significativa hasta 0.66 mg/L a los 5 minutos de contacto, lo que evidencia una alta

afinidad del cobre por la materia orgánica del estiércol de cuy. Este comportamiento se atribuye a procesos de adsorción y complejación química del Cu^{2+} con grupos funcionales presentes en la materia orgánica, como carboxilos y fenólicos.

C. EFICIENCIA DE REMOCIÓN

En el presente estudio, la eficiencia de remoción de metales pesados se evaluó con el objetivo de cuantificar la capacidad del sistema filtrante pasivo para reducir la concentración de hierro (Fe) y cobre (Cu) presentes en el drenaje ácido de mina (DAM). Para ello, se compararon las concentraciones iniciales de los metales en el DAM sin tratamiento con las concentraciones finales obtenidas después del tratamiento mediante los biofiltros, empleando la expresión mostrada en la ecuación 1:

$$PR = \frac{DAM_{inicial} - DAM_{final}}{DAM_{inicial}} * 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

PR=Porcentaje de remoción (%)

DAM Inicial = Concentración inicial de DAM (mg/L)

DAM Final = concentraciones posteriores al tratamiento.

TABLA V
CONCENTRACIONES DE FE Y CU EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Muestra	Tiempo (min)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)
Sin tratamiento	0	31.7	30.7
Tratamiento 1	5	6.02	5.40
	10	5.04	3.13
	15	4.62	2.85
Tratamiento 2	5	3.71	3.05
	10	4.74	4.24
	15	4.67	4.74
Tratamiento 3	5	3.39	0.66
	10	3.22	1.38
	15	3.84	2.45

La tabla VI muestra las concentraciones de hierro (Fe) y cobre (Cu) medidas en el drenaje ácido de mina antes y después del tratamiento con biofiltros pasivos, en función del tiempo de contacto y de la composición de cada tratamiento. El DAM sin tratamiento presentó concentraciones iniciales de 31.7 mg/L de Fe y 30.7 mg/L de Cu, confirmando la presencia significativa de metales disueltos bajo condiciones fuertemente ácidas (pH 2.7–2.72).

En el tratamiento 1 se observa una disminución progresiva en las concentraciones de ambos metales, registrándose valores de 6.02 mg/L de Fe y 5.40 mg/L de Cu a los 5 minutos, los cuales continuaron descendiendo hasta 4.62 mg/L de Fe y 2.85 mg/L de Cu a los 15 minutos. Este comportamiento evidencia un proceso sostenido de remoción, asociado a la neutralización del medio y a la retención progresiva de metales dentro del biofiltro.

El tratamiento 2 presentó un comportamiento más variable, con concentraciones de hierro que oscilaron entre 3.71 y 4.74 mg/L, mientras que el cobre alcanzó valores de hasta 4.74 mg/L. Estos resultados indican una remoción importante, aunque con menor estabilidad en comparación con los otros tratamientos, posiblemente debido a un balance menos favorable entre alcalinidad y materia orgánica, lo que limita los procesos de adsorción y precipitación.

En contraste, el tratamiento 3 mostró las menores concentraciones finales de cobre, alcanzando valores de hasta 0.66 mg/L a los 5 minutos, lo que evidencia una mayor afinidad del sistema por este metal. En el caso del hierro, registró valores de 3.39 mg/L, 3.22 mg/L y 3.84 mg/L a los 5, 10 y 15 minutos, respectivamente, reflejando un comportamiento más estable y el mejor desempeño global para este metal.

TABLA VI
PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE FE Y CU EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Muestra	Tiempo (min)	Remoción Fe (%)	Remoción Cu (%)
Muestra 1	5	81.0	82.4
Muestra 1	10	84.1	89.8
Muestra 1	15	85.4	90.7
Muestra 2	5	88.3	90.1
Muestra 2	10	85.0	86.2
Muestra 2	15	85.3	84.6
Muestra 3	5	89.3	97.8
Muestra 3	10	89.8	95.5
Muestra 3	15	87.9	92.0

La tabla VII sintetiza los porcentajes de eficiencia de remoción de hierro (Fe) y cobre (Cu) obtenidos a partir del tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) mediante biofiltros pasivos elaborados con materiales orgánicos locales. Dichos porcentajes fueron calculados tomando como referencia la concentración inicial del DAM sin tratamiento, lo que permite evaluar de manera objetiva la capacidad real del sistema filtrante para reducir la carga metálica disuelta. Los resultados evidencian una marcada dependencia de la eficiencia de remoción respecto al tiempo de contacto y, principalmente, a la composición del biofiltro.

El hierro presentó un comportamiento controlado fundamentalmente por procesos de neutralización y precipitación inducidos por el incremento del pH. En todas las formulaciones evaluadas se observó una reducción significativa de la concentración inicial de Fe, alcanzándose porcentajes de remoción superiores al 80 % desde los primeros 5 minutos de contacto. Este comportamiento indica que el sistema filtrante posee una elevada capacidad inicial para inmovilizar el hierro disuelto, especialmente en condiciones de rápida elevación del pH.

El tratamiento 3 destacó consistentemente como la formulación más eficiente, registrando porcentajes de remoción cercanos al 90 % en los tiempos de 5 y 10 minutos. Este

desempeño se atribuye a su composición equilibrada, la cual favorece una neutralización progresiva de la acidez sin generar condiciones de alcalinidad extrema. Bajo estas condiciones, el hierro tiende a precipitar principalmente en forma de hidróxidos férricos, los cuales quedan retenidos dentro de la matriz porosa del biofiltro, reduciendo su movilidad en la fase acuosa.

En contraste, los tratamientos 1 y 2, si bien alcanzaron valores elevados de remoción inicial, mostraron una ligera disminución de la eficiencia a tiempos mayores. Este comportamiento puede estar asociado a fenómenos de saturación de los sitios reactivos del material filtrante o a la redisolución parcial de especies férricas bajo condiciones de pH excesivamente alcalino, particularmente en sistemas con mayor proporción de ceniza vegetal. Estos resultados ponen de manifiesto que una neutralización agresiva no garantiza necesariamente una mayor eficiencia sostenida en la remoción de hierro.

Asimismo, el cobre presentó un comportamiento marcadamente distinto al del hierro, evidenciando una mayor estabilidad y eficiencia de remoción a lo largo del tiempo. En todos los tratamientos se observaron porcentajes elevados de remoción, siendo nuevamente el Tratamiento 3 el que alcanzó los valores más altos, con eficiencias superiores al 95 % en los primeros minutos de contacto. Este resultado refleja una alta afinidad del cobre por los componentes orgánicos del biofiltro.

La elevada eficiencia en la remoción de Cu puede explicarse por la presencia de materia orgánica rica en grupos funcionales activos, como carboxilos, fenoles y aminas, presentes principalmente en el estiércol de cuy y vacuno, los cuales facilitan mecanismos de adsorción superficial, complejación química y retención por intercambio iónico, permitiendo una rápida inmovilización del cobre incluso en tiempos cortos de contacto. Asimismo, el incremento acelerado del pH observado en los tratamientos con mayor proporción de ceniza vegetal se atribuye a la presencia de óxidos y carbonatos alcalinos, principalmente CaO y K₂O, que reaccionan con la acidez del DAM generando procesos de neutralización inmediata. Diversos estudios han demostrado que las cenizas de biomasa poseen una elevada capacidad de amortiguamiento químico y favorecen la precipitación de metales en forma de hidróxidos estables [13].

En el tratamiento 1, aunque se alcanzaron porcentajes de remoción considerables, la eficiencia fue ligeramente inferior a la observada en el Tratamiento 3, lo que sugiere que un contenido más elevado de ceniza vegetal prioriza la elevación del pH por encima de la generación de sitios activos para la retención del metal. Por su parte, el Tratamiento 2 presentó un comportamiento intermedio, lo que indica que la proporción de materia orgánica juega un rol determinante en la eficiencia del sistema para la remoción de cobre.

El análisis comparativo de ambos metales evidencia que el sistema de biofiltros pasivos presenta una mayor eficiencia y

estabilidad en la remoción de cobre que de hierro. Mientras que la remoción del Fe depende principalmente de procesos fisicoquímicos controlados por el pH, tales como la precipitación y coprecipitación de hidróxidos, la remoción del Cu está dominada por mecanismos de interacción con la materia orgánica del biofiltro, los cuales son menos sensibles a fluctuaciones de pH.

Este comportamiento explica por qué el tratamiento 3, caracterizado por una proporción balanceada entre alcalinidad y materia orgánica, presenta un desempeño superior para ambos metales. La sinergia entre una neutralización moderada y la alta disponibilidad de sitios orgánicos activos permite maximizar la eficiencia del sistema, evitando efectos adversos asociados a la alcalinidad extrema y a la saturación temprana del material filtrante. La elevada remoción de cobre observada en este tratamiento se asocia a la presencia de materia orgánica rica en grupos funcionales carboxílicos y fenólicos, los cuales favorecen mecanismos de adsorción, intercambio iónico y formación de complejos estables con los iones Cu^{2+} [16]. Este comportamiento confirma la mayor afinidad del cobre frente al hierro, cuya inmovilización depende principalmente de procesos de precipitación controlados por el pH.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la eficiencia del sistema de biofiltros pasivos no depende exclusivamente del incremento del pH, sino de una interacción compleja entre la composición del material filtrante, el tiempo de contacto y los mecanismos geoquímicos específicos de cada metal. El Tratamiento 3 se consolida como la formulación más eficiente y estable, posicionándose como una alternativa ecoeficiente y técnicamente viable para el tratamiento del drenaje ácido de mina con presencia de hierro y cobre. Este análisis resalta la importancia de optimizar las proporciones de los materiales orgánicos utilizados, particularmente en contextos rurales y andinos, donde el acceso a tecnologías convencionales es limitado, pero existe una alta disponibilidad de residuos orgánicos con potencial de valorización ambiental.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten analizar en profundidad el comportamiento fisicoquímico del drenaje ácido de mina (DAM) tratado mediante biofiltros pasivos elaborados con materiales orgánicos locales, específicamente estiércol de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal. El análisis experimental evidenció que las concentraciones finales de hierro (Fe) y cobre (Cu) varían de manera significativa en función del tiempo de contacto, la composición del material filtrante y el pH alcanzado durante el tratamiento, lo que confirma la complejidad de los mecanismos de remoción involucrados. En este sentido, se corrobora que la movilidad del Fe y Cu en medios acuosos depende de condiciones fisicoquímicas como el pH y la presencia de materia orgánica, factores que también fueron determinantes en el presente estudio [2].

El DAM sin tratamiento presentó concentraciones iniciales elevadas de hierro (≈ 31.7 mg/L) y cobre (≈ 30.7 mg/L), asociadas a un sistema altamente ácido (pH 2.7–2.72), condición que favorece la elevada movilidad y biodisponibilidad de los metales disueltos. Tras la aplicación de los biofiltros pasivos, se observó una reducción significativa de las concentraciones metálicas, aunque con comportamientos diferenciados entre ambos elementos y entre las distintas formulaciones evaluadas.

El hierro mostró una remoción dependiente principalmente del pH y del tiempo de contacto. Los tratamientos 1 y 2 lograron reducciones importantes respecto a la concentración inicial; sin embargo, la eficiencia tendió a estabilizarse o disminuir ligeramente a mayores tiempos de contacto. Este comportamiento sugiere que, si bien el incremento del pH favorece la precipitación del hierro en forma de hidróxidos férricos, condiciones de alcalinidad elevada pueden inducir fenómenos de saturación del material filtrante o redisolución parcial de fases sólidas, limitando la eficiencia sostenida del sistema. En contraste, el Tratamiento 3 presentó el mejor desempeño, alcanzando porcentajes de remoción cercanos al 90 % en los primeros 10 minutos de contacto. La ligera disminución observada a los 15 minutos indica que la remoción de hierro en sistemas pasivos no es indefinidamente creciente y está sujeta a un equilibrio dinámico entre precipitación, retención y posibles procesos de redisolución, ampliamente documentados en la literatura sobre tratamiento pasivo de DAM.

El cobre presentó un comportamiento significativamente más favorable que el hierro, con mayores y más estables eficiencias de remoción, particularmente en el Tratamiento 3. En esta formulación se alcanzaron porcentajes superiores al 90 % desde los primeros minutos de contacto, los cuales se mantuvieron elevados a lo largo del ensayo experimental. Este desempeño se explica por la alta afinidad del cobre con la materia orgánica presente en el biofiltro, así como por los procesos de adsorción superficial característicos de los biosorbentes naturales [7], lo que evidencia que su remoción no depende exclusivamente del pH del medio.

La materia orgánica aportada por el estiércol de cuy y vacuno contiene compuestos ricos en grupos funcionales, como carboxilos, fenólicos y amínicos, los cuales facilitan mecanismos de adsorción superficial, complejación química e intercambio iónico del Cu^{2+} . Estos procesos permiten una inmovilización eficiente del cobre incluso en condiciones alcalinas, explicando su mayor estabilidad frente a variaciones de pH y tiempo de contacto.

El comportamiento del pH en la eficiencia de remoción para todas las formulaciones confirma la elevada capacidad neutralizante de los materiales empleados, especialmente de la ceniza vegetal, cuyo contenido de óxidos metálicos (CaO , K_2O y MgO) genera una neutralización rápida del DAM. El Tratamiento 1, con mayor proporción de ceniza, alcanzó los

valores de pH más elevados, evidenciando una neutralización más agresiva que, si bien reduce la acidez, no optimiza necesariamente la remoción metálica.

Por el contrario, el tratamiento 3 mostró una neutralización progresiva y controlada, alcanzando valores de pH más estables, lo que favoreció un entorno químicamente más equilibrado. Esta condición permitió maximizar la eficiencia de remoción tanto del hierro como del cobre, evidenciando que la alcalinidad extrema no constituye por sí sola un criterio suficiente de eficiencia, sino que debe ir acompañada de una adecuada proporción de materia orgánica reactiva.

En términos de implicancias ambientales y comparación con estudios previos, el comportamiento del hierro mostró una alta dependencia del pH, observándose incluso variaciones en su concentración residual entre tratamientos, fenómeno asociado a la precipitación, retención y posible redisolución de especies férricas bajo condiciones de alcalinidad elevada [8]. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que señalan que la eficiencia de los sistemas pasivos de tratamiento de drenaje ácido de mina depende de la sinergia entre el pH, la composición del material filtrante y el tiempo de contacto. En este contexto, diversos estudios han demostrado que los materiales orgánicos favorecen significativamente la remoción de metales como el cobre, mientras que el hierro requiere condiciones más específicas para lograr su precipitación y estabilización efectiva.

Los procesos de remoción observados en el sistema filtrante no dependen exclusivamente de la neutralización alcalina, sino que también están influenciados por mecanismos biogeoquímicos asociados a la actividad microbiana y a reacciones de microelectrólisis, los cuales favorecen la precipitación de sulfuros metálicos y la reducción de sulfatos [12].

V. CONCLUSIONES

El sistema de biofiltros pasivos elaborado con estiércol de cuy, estiércol vacuno y ceniza vegetal demostró una elevada capacidad de neutralización del drenaje ácido de mina (DAM), logrando incrementar el pH desde valores extremadamente ácidos (2.7–2.72) hasta condiciones neutras y alcalinas en cortos tiempos de contacto. Estos resultados confirman el potencial de esta alternativa como una tecnología ecoeficiente y de bajo costo para el control de la acidez en efluentes mineros, basada en el aprovechamiento de materiales orgánicos de fácil disponibilidad. Asimismo, la aplicación de biofiltros pasivos se alinea con las tendencias actuales de tratamiento de aguas ácidas, que priorizan soluciones de bajo impacto ambiental y de fácil replicabilidad.

El incremento del pH estuvo directamente influenciado por la proporción de ceniza vegetal, debido a su elevado contenido de óxidos y carbonatos alcalinos. Sin embargo, se evidenció que alcalinidades excesivas, como las observadas en el Tratamiento

1, no garantizan una mayor eficiencia de remoción metálica y pueden afectar la estabilidad del sistema, favoreciendo procesos de redisolución o liberación secundaria de metales.

En relación con la remoción de hierro (Fe), el sistema mostró una eficiencia elevada y dependiente del tiempo de contacto y del equilibrio químico alcanzado. El Tratamiento 3 presentó el mejor desempeño, alcanzando porcentajes de remoción cercanos al 90 % en los primeros 10 minutos, lo que evidencia que una neutralización moderada y una adecuada proporción de materia orgánica favorecen la inmovilización del hierro bajo las condiciones experimentales evaluadas.

La remoción de cobre fue significativamente más eficiente y estable en comparación con el hierro, especialmente en el Tratamiento 3, donde se alcanzaron eficiencias superiores al 95 %, lo que confirma la alta afinidad del cobre por la materia orgánica del biofiltro. Este metal fue retenido principalmente mediante procesos de adsorción y complejación química asociados a los componentes orgánicos del estiércol de cuy y vacuno. La elevada eficiencia observada se relaciona con la afinidad del ion Cu^{2+} por los grupos funcionales presentes en dichos materiales, capaces de retener iones metálicos mediante mecanismos de complejación superficial e intercambio iónico.

El tiempo de contacto evidenció que los mayores cambios en la concentración de hierro (Fe) y cobre (Cu) ocurrieron durante los primeros minutos de tratamiento, lo que confirma la alta reactividad inicial del sistema de biofiltros pasivos. Sin embargo, al incrementarse el tiempo de contacto, pueden presentarse fenómenos de saturación del material filtrante o redisolución parcial de los metales, especialmente bajo condiciones de pH elevado. Este comportamiento resalta la importancia de definir tiempos de operación cortos y controlados, en los cuales el sistema mostró mayor estabilidad y eficiencia en la remoción de cobre y una remoción elevada de hierro, sin generar incrementos significativos en la concentración residual de los metales en el medio acuoso.

REFERENCES

- [1] Á. F. Ordoñez-Pacheco, "Metodología de la investigación: metodología académica con aplicación a las investigaciones sociales: enfoques, tipos, métodos y diseños," *Sociedad & Tecnología*, vol. 8, no. 2, 2025, doi: 10.51247/st.v8i2.484.
- [2] H. Li, J. Di, Y. Dong, S. Bao, and S. Fu, "Dynamic experiment on remediation of acid mine drainage by iron-carbon microelectrolysis enhancing sulfate-reducing bacteria," *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 9, pp. 1413–1425, 2023, doi: 10.1039/D2EW00947A.
- [3] A. Saleem, A. Zulfikar, M. Z. Saleem, *et al.*, "Alkaline and acidic soil constraints on iron accumulation by rice cultivars in relation to several physio-biochemical parameters," *BMC Plant Biology*, vol. 23, art. no. 397, 2023, doi: 10.1186/s12870-023-04400-x.
- [4] E. Coayla, V. L. Romero Carrion, and Y. T. Bedón Soria, "Regulación económica e impacto ambiental de la gran minería cuprífera en el desarrollo de Perú," *Economía*,

Sociedad y Territorio, vol. 24, no. 74, e2032, 2024, doi: 10.22136/est20242032.

- [5] A. Bardales Shuña and E. Vilcazan Mamani, *Neutralización de aguas ácidas con elevada concentración de metales*, bachelor's thesis, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2021.
- [6] A. A. Bogush, C. Dabu, V. D. Tikhova, J. K. Kim, and L. C. Campos, "Biomass Ashes for Acid Mine Drainage Remediation," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, pp. 4977–4989, 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00804-9.
- [7] I. G. Al-Labadi, M. Horváth, A. T. Alkilani, *et al.*, "Simultaneous adsorptive removal of Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , and Zn^{2+} using raw Norway Spruce biomass: a low-cost and eco-friendly solution for wastewater treatment," *Frontiers in Water*, vol. 7, art. no. 1612232, 2025, doi: 10.3389/frwa.2025.1612232.
- [8] S. E. Pabón Guerrero, R. Benítez Benítez, R. A. Sarria Villa, and J. A. Gallo Corredor, "Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, no. 27, pp. 9–18, 2020.
- [9] V. B. Enciso-Rondon, J. M. Guadalupe-Lazaro, P. L. Boza-Sullca, N. Tantavilca-Martinez, and S. L. Arcos-Chuquillanqui, "Toxic Metals Reduction in Acid Mine Drainage Through the Use of Calcium Carbonate: A Case Study in Canchayllo, Peru," in *Environmental Science and Technology: Sustainable Development II*, Y. Zeng and S. Wang, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2024, pp. 107–121, doi: 10.1007/978-3-031-54684-6_9.
- [10] A. S. León, W. Pastor Contreras, R. S. León, Y. Aroquipa Duran, N. Chambi Condori, and H. C. Ticona Arapa, "Efecto del compostaje de desechos orgánicos municipales en la enmendación del drenaje ácido de mina," *Revista Alfa*, vol. 7, no. 19, pp. 103–116, 2023, doi: 10.33996/revistaalfa.v7i19.201.
- [11] M. C. Cáceres Obada, M. E. F. Zegarra Oliveira, N. Y. Meza Elguera, S. E. Sosa Pulcha, A. A. Portocarrero Banda, J. A. Quispe Ortiz, V. Salinas Murillo, and H. G. Jiménez Pacheco, "Assessment of heavy metal contamination in surface sediments: Seasonal influence in the Majes–Camaná basin of the Arequipa region, Peru," *Results in Engineering*, vol. 25, art. no. 103673, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103673.
- [12] J. V. Palomino Muriel, "Remoción de cobre (II) mediante adsorción en agua subterránea usando estiércol de ganado vacuno en el distrito de Ananea," bachelor's thesis, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2023.
- [13] A. Gupta, P. Balomajumder, and V. K. Agarwal, "A Review of Adsorbents for Heavy Metal Decontamination: Growing Approach to Wastewater Treatment," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 4191–4198, 2021.