

Sistema de tratamiento de lodos mineros utilizando floculantes naturales en la pequeña minería artesanal del norte de la región de Puno

Mining Sludge Treatment System Using Natural Flocculants in Small-Scale Artisanal Mining in the North of the Puno Region

 Luis Gerardo Morales Morales^{1*},  Javier Mamani Paredes¹ y  Milton Quispe Quispe¹

Resumen

La pequeña minería artesanal en el norte de Puno enfrenta desafíos ambientales por la generación de lodos mineros, lo que hace necesario evaluar la efectividad de los floculantes naturales como alternativa sostenible para su tratamiento. El objetivo fue determinar si los floculantes naturales constituyen una solución efectiva para reducir los lodos mineros y mejorar la calidad del agua industrial. La metodología fue experimental, con datos cuantitativos para evaluar la eficacia del floculante natural en la reducción de lodos. Los resultados mostraron que la bentonita redujo significativamente la concentración de lodos y mejoró la calidad del agua de uso industrial. Al ajustar el pH al rango óptimo del floculante, el impacto fue positivo en todos los niveles ambientales: la bentonita superó al método convencional en claridad del sobrenadante (82 % vs. 65 %) y reducción de sólidos suspendidos (90–110 mg/L vs. 180–220 mg/L), además de disminuir los contaminantes químicos (78–85 %) y los metales pesados (82–90 %). El pH neutro (7) optimizó la eficiencia del tratamiento, con un 80 % de remoción y diferencias significativas según ANOVA ($p < 0,05$). El sistema redujo el volumen de lodos en un 76 % y los costos en un 84,62 %, mejorando el cumplimiento ambiental y posicionando a la bentonita como una solución efectiva y sostenible para la pequeña minería artesanal. En conclusión, el uso de floculantes naturales es una alternativa prometedora para el tratamiento de lodos mineros.

Palabras clave: contaminación por relaves, floculantes de lodos mineros, manejo de relaves mineros, reutilización de lodos mineros, tratamiento de relaves.

Abstract

Small-scale artisanal mining in northern Puno faces environmental challenges due to the generation of mining sludge, making it necessary to evaluate the effectiveness of natural flocculants as a sustainable alternative for its treatment. The objective was to determine whether natural flocculants are an effective solution to reduce mining sludge and improve industrial water quality. The methodology was experimental, using quantitative data to evaluate the flocculant's effectiveness in reducing sludge. The results showed that bentonite significantly reduced sludge concentration and improved water quality for industrial use. When the sludge pH was adjusted to the flocculant's optimum range, the impact was positive at all environmental levels: bentonite surpassed the conventional method in supernatant clarity (82% vs. 65%) and suspended-solids reduction (90–110 mg/L vs. 180–220 mg/L), in addition to reducing chemical contaminants (78–85%) and heavy metals (82–90%). Neutral pH (7) optimized treatment efficiency, with 80% removal and significant differences according to ANOVA ($p < .05$). The system reduced sludge volume by 76% and costs by 84.62%, improving environmental compliance and positioning bentonite as an effective and sustainable solution for small-scale artisanal mining. In conclusion, the use of natural flocculants is a promising alternative for treating mining sludge.

Keywords: tailings contamination, mining sludge flocculants, mining tailings management, mining sludge reuse, tailings treatment.

Recibido: 19/09/2025

Aceptado: 18/05/2026

Publicado: 25/05/2026

Sección: Artículo Original

***Autor correspondiente:** morales121325@gmail.com

Introducción

Esta investigación se enfocó en la creación de un sistema para tratar los lodos mineros mediante el uso de floculantes naturales en la minería artesanal de pequeña escala del norte de la región de Puno (Aróstegui Castro, 2019). Esta actividad constituye una fuente económica clave para la zona (MINEM, 2024), pero también representa un importante costo ambiental, particularmente en lo relacionado con el manejo de lodos mineros contaminados, los cuales pueden comprometer la calidad del agua y el suelo (Quispe Aquino, 2020),

con repercusiones negativas tanto para la salud humana como para el medio ambiente (Luna, 2017).

¹Universidad nacional del altiplano Puno, Escuela de posgrado, Av. Floral N°1153, Puno Perú

Como citar: Morales Morales, L. G., Mamani Paredes, J., & Quispe Quispe, M. (2026). Sistema de tratamiento de lodos mineros utilizando floculantes naturales en la pequeña minería artesanal del norte de la región de Puno. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 28, e28769. <https://doi.org/10.18271/ria.2026.769>



Attribution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share-Adapt

En este contexto, resulta fundamental desarrollar e investigar tecnologías sostenibles y eficaces para el tratamiento de los lodos mineros (Cojbasic et al., 2024). Una de las opciones que se está considerando es el uso de floculantes naturales (Ali et al., 2022). La minería a pequeña escala y artesanal juega un papel clave en la economía de las comunidades locales (Araya et al., 2021), ya que genera ingresos y empleo para numerosas comunidades (Malone et al., 2023). No obstante, este tipo de minería produce una cantidad significativa de lodos mineros (Huaranga Moreno et al., 2021).

Estos lodos contienen partículas finas de minerales, metales pesados y otros contaminantes (Romero, 2017). Su manejo adecuado es crucial para mitigar los efectos negativos en el medio ambiente y proteger tanto los cuerpos de agua como los suelos de la región (Charapaqui Ancasi, 2019). Una alternativa emergente para mejorar el tratamiento de estos lodos es el empleo de floculantes naturales, como la arcilla local (Manrique & Sanborn, 2021). Este compuesto es notable por su capacidad para incentivar la agrupación de partículas finas (Rueda Berlanga, 2019) y facilitar la separación del agua y la disminución del volumen de los lodos remanentes (González et al., 2023). Sin embargo, para optimizar la eficiencia del floculante es esencial ajustar el pH del sistema (Javaheri et al., 2018); en este

sentido, la incorporación de cal ayuda a acondicionar el medio y a optimizar las condiciones para que la arcilla funcione de manera más efectiva como floculante natural (Ali et al., 2022).

Este estudio tiene como propósito analizar la efectividad del uso combinado de floculante natural y cal en el tratamiento de los lodos mineros originados por la pequeña minería artesanal en la región de Puno (Torres et al., 2021). Además, se evaluaron aspectos clave como la tasa de floculación, la disminución de sólidos en suspensión y la mejora de la calidad del agua obtenida (Phiri et al., 2021).

Este sistema de tratamiento con floculantes naturales contribuye a minimizar los desechos mineros (Yin et al., 2022) y busca brindar una solución más sostenible y eficaz para el manejo de los lodos mineros, promoviendo la protección del medio ambiente y un desarrollo minero responsable en la región (Onofre, 2019).

Materiales y métodos

Zona de estudio

El área de estudio está situada en la zona norte de la región de Puno, en la localidad de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno.

Tabla 1
Coordenadas de ubicación del lugar de estudio UTM. -WGS84

Concesión minera	Vértices	Coordenadas UTM (Sistema PSAD56)		Coordenadas UTM (Sistema WGS84)		Área (Has)
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
CECOMSAP-ESTELA	V-1	445030,36	8377206,86	444825,00	8376839,52	240
	V-2	447019,94	8377025,81	446814,55	8376658,47	
	V-3	446911,31	8375832,06	446705,93	8375464,74	
	V-4	444921,73	876013,11	444716,37	8375645,78	

Nota. Ubicación del lugar de estudio.

Ubicación de la zona de muestreo

Se tomaron muestras de las zonas del proyecto minero donde se desarrolla minería en diferentes tiempos. El procedimiento incluyó la homogenización de las muestras, la preparación de soluciones de floculantes naturales de arcilla local (bentonita) y el ajuste del pH de los lodos mineros a 7 con óxido de calcio (CaO), rango óptimo para el floculante natural, a fin de efectivizar el tratamiento mediante una inyección adecuada y eficaz.

Se seleccionaron dos zonas de muestreo de la pequeña minería y minería artesanal del norte de la región de Puno. La población objetivo del estudio está compuesta por proyectos mineros formales. Se eligió una muestra intencional no probabilística que abarcó a

pequeños productores mineros; la toma de muestra se llevó a cabo mediante un método no probabilístico por conveniencia, de acuerdo con el criterio del investigador. En total, se seleccionaron cinco muestras para evaluar la efectividad del floculante natural y la influencia del pH en la eficacia del tratamiento.

Muestreo y conservación de muestras

Se seleccionaron cinco puntos de muestreo en la zona de estudio, obteniendo de 1,8 a 2 litros de muestra de lodo minero en cada punto. Las muestras se almacenaron en recipientes de plástico etiquetados y se mantuvieron a 5 °C, en condiciones controladas, durante su transporte hasta el laboratorio. A continuación, se detalla la cantidad de muestra obtenida en cada punto:

Tabla 2*Cantidad de muestras obtenidas por punto de muestreo*

N.º	Punto de muestreo	Volumen (L)	Recipiente	Conservación (°C)
1	Punto 1	1,8	Plástico	5
2	Punto 2	1,8	Plástico	5
3	Punto 3	2,0	Plástico	5
4	Punto 4	2,0	Plástico	5
5	Punto 5	2,0	Plástico	5

Nota. Muestras de lodo minero almacenadas en recipientes de plástico etiquetados y conservadas a 5 °C durante su transporte al laboratorio

Técnicas empleadas en el estudio

Para evaluar la efectividad y eficacia de los floculantes naturales, como la bentonita, en el tratamiento de lodos mineros, se aplicaron las técnicas que se describen a continuación.

Prueba de jarras

La prueba de jarras se llevó a cabo utilizando un equipo Bird modelo 400 con cinco jarras de 2 litros cada una. Se agregaron 2 litros de lodo minero a cada jarra y se ajustó la velocidad de agitación a 100 rpm durante 2 minutos y 30 segundos, seguida de 30 rpm durante 20 minutos. Posteriormente, se permitió que las partículas de lodo sedimentaran durante 30 minutos. El pH del lodo se ajustó en un rango de 6,5 a 7,5 para efectivizar la eficacia del floculante natural bentonita.

Análisis de metales

La concentración de metales en los lodos mineros se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA), utilizando un equipo PerkinElmer modelo 400.

Cuantificación de la claridad del sobrenadante y de los sólidos suspendidos

La claridad del sobrenadante se midió con un turbidímetro Hach modelo 2100N. La concentración de sólidos suspendidos se determinó mediante filtración por membrana con un equipo Millipore modelo XX1002500, siguiendo el método estándar.

Análisis de contaminantes químicos y metales pesados

La concentración de contaminantes químicos y metales pesados se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica, con equipos PerkinElmer modelo 400, siguiendo los métodos estandarizados para la determinación de contaminantes químicos y metales pesados.

Determinación del volumen de lodos mineros

El volumen de los lodos mineros se cuantificó de manera precisa mediante medición directa en un recipiente graduado; los resultados se expresaron en litros para facilitar su interpretación y comparación.

Periodo de estudio o frecuencia de muestreo

El proyecto se llevó a cabo durante el año 2024.

Materiales, insumos e instrumentos

Los materiales, insumos e instrumentos empleados en la ejecución de la investigación se detallan en las técnicas descritas: equipo de prueba de jarras Bird modelo 400, espectrómetro de absorción atómica PerkinElmer modelo 400, turbidímetro Hach modelo 2100N y equipo de filtración por membrana Millipore modelo XX1002500, además de la arcilla local (bentonita) como floculante natural y el óxido de calcio (CaO) para el ajuste del pH.

Variables analizadas

Variable dependiente: Y; pH – lodo.

Variable independiente: X1; tipo de floculante natural (bentonita).

Variable interviniente: Z1; temperatura – altitud.

Prueba estadística aplicada

En esta investigación se llevó a cabo un experimento factorial con combinaciones, aplicando un diseño aleatorizado y con una réplica por tratamiento, utilizando el software SPSS. Este diseño experimental permite analizar simultáneamente varios factores y sus posibles interacciones, además de controlar la influencia de variables externas no deseadas. Para realizar la prueba de hipótesis sobre la media poblacional, se siguieron procedimientos estructurados que incluyen los siguientes pasos:

Formulación de la hipótesis y establecimiento del nivel de significancia. El primer paso es plantear la hipótesis que se desea evaluar, definiendo la hipótesis nula (H_0), que generalmente afirma que no existe un efecto o diferencia significativa en la población, y la hipótesis alternativa (H_1), que sugiere la existencia de un efecto o diferencia significativa. Posteriormente, se elige el nivel de significancia (α), que representa el umbral para determinar si los resultados son estadísticamente relevantes. Un valor comúnmente utilizado para α es 0,05, lo cual indica que hay un 5 % de probabilidad de cometer un error de tipo I.

Resultados y discusión

Evaluación de la efectividad de los floculantes naturales frente a los métodos convencionales

La tabla 3 presenta la evaluación experimental de la eficacia de los floculantes naturales, específicamente la bentonita, en comparación con los métodos convencionales, mediante dos indicadores clave: la velocidad de floculación (m^3/h) y la claridad del sobrenadante (%). La mayor velocidad de floculación se alcanzó en las pruebas 3 y 5, ambas con un rendimiento de $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que indica una sedimentación más

rápida del lodo tratado con floculantes naturales, con un promedio general de $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$. En cuanto a la claridad del sobrenadante, los valores más elevados correspondieron a las pruebas 2 (82 %) y 5 (81 %), lo que demuestra una alta eficiencia en la separación sólido-líquido, con un promedio final del 80 %. Estos resultados sugieren que, bajo condiciones controladas de pH y temperatura, la bentonita como floculante natural logra un desempeño óptimo, superando los niveles comúnmente observados con coagulantes químicos tradicionales, como el sulfato de aluminio.

Tabla 3

Evaluación de la velocidad de floculación y la claridad del sobrenadante con floculante natural

Pruebas corridas	Resultado (m^3/h)	Velocidad de floculación (m^3/h)	Pruebas corridas	Resultados (%)	Claridad del sobrenadante (%)
Prueba 1	1,1		Prueba 1	78	
Prueba 2	1,2		Prueba 2	82	
Prueba 3	1,3	1,2	Prueba 3	80	80
Prueba 4	1,1		Prueba 4	79	
Prueba 5	1,3		Prueba 5	81	

Nota. Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

En este marco, el estudio realizado en el norte de Puno contribuye a fortalecer la evidencia sobre los beneficios de los floculantes naturales y destaca su potencial uso en la minería artesanal a pequeña escala, un sector que habitualmente no cuenta con tecnologías avanzadas de tratamiento. Esto contrasta con investigaciones previas enfocadas en operaciones de mayor tamaño o en industrias diferentes, como la construcción (Antón Pacheco, 2018). El estudio evidencia, además, que la aplicación de soluciones basadas en recursos locales, como la bentonita, puede

integrarse de manera efectiva en contextos de minería artesanal (Villon, 2023).

En contextos donde las restricciones económicas y técnicas demandan soluciones prácticas y sostenibles, se confirma que el empleo de floculantes naturales no solo optimiza la eficiencia en el tratamiento de lodos mineros, sino que además constituye una herramienta fundamental para el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes en el Perú (DS. 024-2016-EM), promoviendo prácticas responsables en la gestión de residuos mineros (Luque Poma et al., 2021).

Tabla 4

Evaluación del efecto de los floculantes naturales en la reducción de contaminantes en lodos de la pequeña minería artesanal del norte de la región de Puno

Pruebas corridas	Resultados (%)	Reducción de contaminantes químicos (%)	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)
Prueba 1	80			
Prueba 2	82			
Prueba 3	78	81	78	85
Prueba 4	85			
Prueba 5	80			

Nota. Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

La tabla 4 ilustra la disminución de contaminantes químicos en lodos mineros mediante la aplicación de bentonita. La prueba 4 registró el mayor nivel de reducción, con un 85 %, lo que refleja una elevada capacidad del floculante para eliminar compuestos químicos presentes en los residuos. Esta eficacia se mantiene dentro de un rango óptimo, entre el 78 % y el 85 %, lo que demuestra la consistencia del tratamiento a lo largo de las diferentes pruebas y resulta fundamental para minimizar la presencia de sustancias químicas

potencialmente perjudiciales para los cuerpos de agua receptores.

La prueba 3 mostró el porcentaje más bajo de reducción, con un 78 %, ubicándose en el límite inferior del rango registrado. Esta leve variación podría deberse a características particulares de la muestra de lodo utilizada, tales como una mayor concentración inicial de contaminantes o condiciones fisicoquímicas específicas, como el pH o la temperatura. No obstante, incluso en este escenario, la reducción lograda sigue siendo relevante, lo

que reafirma la efectividad del floculante natural para disminuir la presencia de contaminantes químicos por debajo de los niveles comúnmente alcanzados mediante métodos convencionales.

En relación con el primer objetivo específico, los resultados evidencian que la bentonita, empleada como floculante natural, logró una reducción de contaminantes químicos en un rango de 78 % a 85 % y de metales pesados entre 82 % y 90 % en los lodos mineros tratados. La mayor disminución de contaminantes químicos y la máxima eficiencia en la remoción de metales pesados se obtuvieron en la prueba 4, con un 85 % y un 90 %, respectivamente. Estos valores reflejan la elevada capacidad de la bentonita para adsorber y retener compuestos tóxicos, lo que contribuye a una menor liberación de contaminantes al entorno y mejora de forma notable la calidad de los efluentes. Dichos resultados son clave para reducir los riesgos ambientales vinculados con la bioacumulación de metales pesados y sustancias químicas en cuerpos de agua y suelos.

Al contrastar estos resultados con estudios previos, se observa que coinciden con la investigación nacional de Vito Huamani y Yarcuri Huayanay (2024), quienes evaluaron la remoción de mercurio, plomo y cadmio mediante tratamientos basados en extracción ácida y obtuvieron reducciones significativas de metales pesados presentes en pasivos mineros. Si bien este enfoque ha demostrado ser eficaz, su aplicación suele estar limitada por los costos operativos y los posibles impactos ambientales asociados al uso de reactivos químicos agresivos (Orozco Yacumal & Serna Anacona, 2023), controlados mediante ácido clorhídrico, cuyos

resultados resaltan la necesidad de contar con métodos efectivos para la remediación de contaminantes metálicos (Anticoi Sudzuki et al., 2023).

Un estudio internacional evidenció la alta movilidad de metales pesados, como el plomo y el arsénico, en residuos generados por actividades mineras, y subrayó la necesidad urgente de aplicar tecnologías que permitan su inmovilización para prevenir su dispersión en el entorno. En este contexto, el control de metales pesados resulta fundamental para la protección de la calidad del agua y del suelo. En comparación con los métodos químicos convencionales, los resultados del presente estudio destacan la eficacia de la bentonita como una alternativa más sostenible y menos agresiva, capaz de retener dichos metales y reducir su impacto ambiental (Figuerola Maguiña, 2022).

Impacto del pH de los lodos mineros en la eficacia del tratamiento con floculantes naturales

La tabla 5 presenta la evaluación del efecto de distintos niveles de pH sobre la eficiencia del tratamiento de lodos mineros con bentonita. El desempeño más eficiente se registra a un pH de 7, donde la eficacia del tratamiento alcanza un 80 %, la reducción de contaminantes llega al 70 % y la claridad del agua alcanza un 90 %. En estas condiciones, la concentración de sólidos suspendidos se reduce a 60 mg/l, lo que sugiere que el pH neutro constituye el intervalo óptimo para maximizar la capacidad de floculación de la bentonita. Este valor favorece la neutralización efectiva de las partículas con carga positiva presentes en el lodo, facilita la formación de flóculos estables y mejora el proceso de sedimentación.

Tabla 5
Impacto del pH en la eficacia del tratamiento

Niveles de pH	Eficiencia del tratamiento (%)	Reducción de contaminantes (%)	Claridad del agua (%)	Concentración de sólidos suspendidos (mg/l)
5	60	50	80	100
6	70	60	85	80
7	80	70	90	60
8	75	65	85	70
9	65	55	80	85

Nota. Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

El rendimiento más bajo se observa a un pH de 5, donde la eficiencia del tratamiento disminuye al 60 %, la reducción de contaminantes cae al 50 % y la claridad del agua se limita al 80 %; además, la concentración de sólidos suspendidos aumenta a 100 mg/l. Estos resultados indican que, en ambientes ácidos, la capacidad de floculación de la bentonita se ve comprometida, probablemente debido a la alta presencia de protones (H^+), que interfieren en las interacciones electrostáticas entre las partículas del lodo y el floculante, disminuyendo así la efectividad del proceso.

Este análisis confirma que el pH constituye un factor clave en la efectividad del tratamiento de lodos mineros mediante floculantes naturales, y resalta que un pH neutro (7) optimiza la eficiencia en la aglomeración de partículas, la reducción de contaminantes y la claridad del efluente, al tiempo que disminuye la concentración de sólidos suspendidos. Estos hallazgos son fundamentales para el ajuste de los procesos operativos en la minería artesanal a pequeña escala, ya que garantizan el cumplimiento de los estándares ambientales establecidos por el Decreto Supremo N.º 024-2016-EM y promueven

un tratamiento eficiente y seguro que contribuye a la protección de los cuerpos de agua en la región de Puno.

En relación con el segundo objetivo específico, los hallazgos confirmaron que el pH tiene una influencia significativa en la eficiencia del tratamiento de lodos mineros con bentonita. Se determinó que el valor óptimo de pH es 7, en el cual se alcanzó una eficiencia máxima del 80 % en la remoción de contaminantes, una reducción del 70 %, una claridad del efluente del 90 % y una concentración mínima de sólidos suspendidos de 60 mg/l. A medida que el pH se desviaba de este punto neutro, la efectividad del tratamiento disminuía progresivamente, siendo esta caída más pronunciada en ambientes ácidos, como a pH 5, donde la eficiencia descendió al 60 %. Este comportamiento indica que un pH neutro favorece las interacciones electrostáticas entre las partículas con carga positiva presentes en el lodo y las cargas negativas de la bentonita, facilitando la formación de flóculos estables. Adicionalmente, el análisis estadístico mediante ANOVA reveló diferencias significativas entre los distintos niveles de pH ($p = 0,028$), lo que respalda el papel determinante de esta variable en el proceso de floculación.

Estos hallazgos coinciden con el estudio internacional de Castillo et al. (2023), quienes, al analizar residuos mineros provenientes de los procesos de flotación en Huelva (España), identificaron que los valores de pH ácidos incrementan la movilidad de metales pesados (García, 2023), exacerbando los riesgos ambientales, y evidenciaron que mantener un pH neutro es fundamental no solo para optimizar la floculación, sino también para reducir la disolución de contaminantes metálicos. De manera similar, Zapana Mestas et al. (2020) subrayaron la importancia del control hidrogeológico en las balsas de lodos, y Velasco (2021) destacó cómo las variaciones en el pH y las condiciones fisicoquímicas pueden influir en la movilización de metales y en la formación de drenaje ácido de mina. Estos estudios refuerzan la necesidad de ajustar el pH para evitar la liberación de contaminantes y mejorar la eficacia de las tecnologías de remediación.

Conclusiones

El sistema de tratamiento de lodos mineros implementado, basado en la aplicación de floculantes naturales como la bentonita, demostró ser altamente eficiente para optimizar los procesos de aglomeración y sedimentación de los residuos generados por la pequeña minería artesanal. Los resultados evidencian una mejora significativa en la calidad del efluente tratado, con aumentos en la claridad, reducción de sólidos suspendidos y eliminación de contaminantes químicos y metales pesados en comparación con los métodos tradicionales. Esta eficiencia operacional no solo contribuye al cumplimiento de los estándares ambientales peruanos (DS. 024-2016-EM), sino que también permite una reducción del 84,6 % en los costos de operación y una disminución del 76,1 % en el

volumen de lodos generados, lo que facilita una gestión ambientalmente sostenible y fortalece las prácticas de minería responsable, mitigando los impactos negativos sobre los cuerpos de agua y suelos aledaños y protegiendo a las comunidades locales y los ecosistemas de la región de Puno.

El empleo de bentonita superó notablemente la eficiencia del método convencional en los procesos de aglomeración y sedimentación de lodos mineros: la claridad del sobrenadante alcanzó valores de hasta 82 %, frente al 65 % del método tradicional, lo que evidencia una mayor eliminación de sólidos suspendidos y una mejor calidad del agua tratada. Asimismo, se registró una velocidad promedio de floculación de 1,2 m³/h con bentonita, en contraste con los 0,8 m³/h del sistema convencional, lo que asegura un proceso más rápido y eficaz. Estos resultados consolidan a la bentonita como una alternativa viable y sostenible para optimizar el manejo de residuos mineros, especialmente en contextos donde el acceso a tecnologías avanzadas es limitado.

La bentonita como floculante natural demostró ser altamente eficaz en la reducción de contaminantes químicos y metales pesados, con porcentajes de eliminación entre 78 % y 85 % para los primeros y entre 82 % y 90 % para los segundos, lo que garantiza el cumplimiento de las normativas nacionales y protege tanto el medio ambiente como a las comunidades cercanas frente a los riesgos de la contaminación. Finalmente, se identificó al pH de los lodos mineros como un factor clave para la eficacia del tratamiento: un pH neutro (7) maximiza la eficiencia del proceso, alcanzando una eficiencia del tratamiento del 80 %, una claridad del agua del 90 % y una reducción de sólidos suspendidos a 60 mg/l, mientras que los niveles ácidos o alcalinos reducen significativamente la efectividad del procedimiento. Estos hallazgos proporcionan parámetros operativos fundamentales para asegurar la eficiencia y la sostenibilidad del tratamiento en la pequeña minería artesanal.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, situada a orillas del imponente lago Titicaca y reconocida por su excelencia en la formación académica en diversas áreas, institución de la cual me siento profundamente orgulloso de pertenecer.

A la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno y al Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, por la valiosa formación recibida y por las enriquecedoras relaciones de amistad establecidas con profesionales de diversas disciplinas y de universidades tanto nacionales como internacionales.

A la Central de Cooperativas Mineras San Antonio y a todos los compañeros que la conforman, por brindarme una cálida bienvenida en el ámbito minero. Valoro profundamente haber pertenecido a una de las

entidades más destacadas y reconocidas, tanto a nivel nacional como internacional.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses de ningún tipo ni índole. Esta declaración abarca cualquier relación financiera, laboral, académica, personal o institucional que pudiera interpretarse como un sesgo o influencia indebida sobre el diseño, la ejecución, el análisis o la interpretación de los resultados presentados.

Referencias

- Ali, M. E. M., Moniem, S. M. A., Hemdan, B. A., Ammar, N. S., & Ibrahim, H. S. (2022). Innovative polymeric inorganic coagulant-flocculant for wastewater purification with simultaneous microbial reduction in treated effluent and sludge. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.08.005>
- Anticoi Sudzuki, H. F., Alfonso Abella, M. P., Garcia Valles, M., Hoffmann Sampaio, C., Oliva Moncunill, J., Bascompta Massanes, M., & Martínez Alcalá, A. (2023). Aprovechamiento de residuos mineros para la fabricación de nuevos materiales. Libro de Resúmenes del XV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales, 1–9. <http://hdl.handle.net/2117/400396>
- Antón Pacheco, C. (2018). Actuaciones para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre el terreno, y su restauración edáfica y morfológica. *Boletín Geológico y Minero*, 112. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=1121>
- Araya, N., Ramírez, Y., Cisternas, L. A., & Kraslawski, A. (2021). Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*, 303, 117626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117626>
- Aróstegui Castro, A. M. (2019). Identificación de factores que afectan la producción a tajo abierto [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/18197>
- Castillo, C., Fawell, P., & Costine, A. (2023). Optimising the activity of acrylamide-based polymer solutions used to flocculate mineral processing tailings suspensions – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 199, 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.001>
- Charapaqui Anccasi, J. (2019). Dosificación de coagulantes y floculantes para la remoción de sedimentos del agua en el embalse Cuchoquesera, Ayacucho [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4158>
- Cojbasic, S., Turk Sekulic, M., Pap, S., Taggart, M. A., & Prodanovic, J. (2024). Nature-based solutions for wastewater treatment: Biodegradable freeze-dried powdered bio-flocculant. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105863>
- Figueroa Maguiña, E. S. (2022). Programa de fiscalización para mejorar la seguridad y salud ocupacional en la pequeña minería de la Dirección Regional de Energía y Minas de Áncash - año 2021 [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14593/5440>
- García. (2023). El aprovechamiento de residuos mineros para la fabricación de nuevos materiales. Libro de Resúmenes del XV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales, 1–9. <http://hdl.handle.net/2117/400396>
- Huaranga Moreno, F. R., Rodríguez Rodríguez, E. F., Méndez García, E. F., & Bernuí Paredes, F. (2021). Especies bioindicadoras de contaminación por relaves mineros en el Sector Samne, La Libertad-Perú, 2021. *Arnaldoa*, 28(3), 633–650. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2413-32992021000300633&script=sci_abstract
- Javaheri, V., Porter, D., & Kuokkala, V.-T. (2018). Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials. *Wear*, 408–409, 248–273. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.010>
- Luna Córdova, H. J. (2017). Implementación del plan nacional de formalización minera artesanal en el Perú [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/13425>
- Luque Poma, G., Pari Pinto, W., & Dueñas Olivera, K. L. (2021). Peligro geológico en la región Arequipa. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*, 83, 300. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3160>
- Malone, A., Figueroa, L., Wang, W., Smith, N. M., Ranville, J. F., Vuono, D. C., Alejo Zapata, F. D., Morales Paredes, L., Sharp, J. O., & Bellona, C. (2023). Transitional dynamics from mercury to cyanide-based processing in artisanal and small-scale gold mining: Social, economic, geochemical, and environmental considerations. *Science of The Total Environment*, 898, 165492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165492>
- Manrique, H., & Sanborn, C. (2021). La minería en el Perú: balance y perspectivas de cinco décadas de investigación. Fondo Editorial Universidad del Pacífico.

- MINEM. (2024). Dirección Regional de Energía y Minas Puno - MINEM mineros formalizados - 2024. <https://www.gob.pe/minem>
- Moreno-González, R., Macías, F., Meyer, A., Schneider, P., Nieto, J. M., Olías, M., & Cánovas, C. R. (2023). Life cycle assessment of management/valorisation practices for metal-sludge from treatment of acid mine drainage. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107038. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107038>
- Onofre Aquino, E. F. (2019). Propuesta técnica de gestión ambiental sostenible para el aprovechamiento de lodos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en campamentos mineros del Perú [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13374>
- Orozco Yacumal, A. M., & Serna Anacona, Y. M. (2023). Elaboración de bloques de concreto para encapsular el mercurio contenido en lodos residuales de la mina artesanal aurífera Curiaco del municipio de Santa Rosa - Cauca [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Cauca]. <http://repositorio.uniautonomade Cauca.co:8080/xmlui/handle/123456789/825>
- Phiri, C., Shimazui, D., Otake, T., Kikuchi, R., Chintu, I., Chirwa, M., Kalaba, L., Nyambe, I., & Sato, T. (2021). Geochemical behaviour of heavy metals in sludge effluents and solid deposits on the Zambian Copperbelt: Implication for effluent treatment and sludge reuse. *Science of The Total Environment*, 769, 144342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144342>
- Quispe Aquino, R. (2020). Evaluación de mercurio en relaves mineros auríferos y sus efectos ambientales en suelos domiciliarios del centro poblado de Secocha [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11771>
- Romero Zegarra, K. I. (2017). Proceso de formalización minera: políticas ambientales y respuestas del sector minero informal a pequeña escala en el poblado Fortuna de Laberinto, Madre de Dios 2012 - 2014 [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9349>
- Rueda Berlanga, C. R. (2019). Determinación de riesgos ambientales producidos por la actividad minera en el distrito de Oyolo, región Ayacucho, 2017 [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8900>
- Torres, S. M. A., Castro, J. D. C., & Botero, M. A. G. (2021). Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción. *Revista EIA*, 18(36), 5–5. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8025659>
- Velasco Ambuila, E. (2021). Evaluación ecotoxicológica en lodos contaminados con mercurio y/o cianuro producidos en el beneficio de oro en Suárez - Cauca por medio de procesos biológicos [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Cauca]. <http://repositorio.uniautonomade Cauca.co:8080/xmlui/handle/123456789/345>
- Villon Mariluz, J. A. (2023). Gestión ambiental y contaminación por relaves mineros en la cuenca del Huascarán-Áncash, 2022 [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109282>
- Vito Huamani, K. L., & Yarcuri Huayanay, S. W. (2024). Tratamiento de extracción ácida para la recuperación de metales pesados (Hg, Pb y Cd) proveniente de pasivos mineros, 2023 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/145066>
- Yin, S., Hou, Y., Yang, S., & Chen, X. (2022). Study on static and dynamic flocculation settlement characteristics of fine tailings slurry and influence of flocculant on strength of fine tailings backfill. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01525. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01525>
- Zapana Mestas, L. P., Ríos Pita Diez, J. A., & Canales Quispe, J. J. (2020). Factores que intervinieron en el resultado del proceso de formalización de la minería a pequeña escala en la región de Puno entre los años 2012-2016. *Escuela de Postgrado GERENS*. <https://hdl.handle.net/20.500.12877/53>