

Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica

Passive treatment of contaminated neutral drainage using sulfate-reducing bioreactor in non-metallic mining

DIAZ – Areli¹ *

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido octubre, 03, 2025; Aceptado noviembre, 21, 2025

Resumen

La minería de yeso genera pasivos ambientales que emiten Drenaje Neutro Contaminado (DNC), un efluente rico en sulfatos y de difícil tratamiento convencional. Este estudio diseña un sistema de tratamiento pasivo para la Cantera Milluni (Bolivia), cuyo efluente presenta concentraciones de sulfatos (700 mg/L) y hierro (2,80 mg/L) que superan la normativa. Se aplicó ingeniería de detalle para dimensionar un Biorreactor Sulfato-Reductor adaptado a condiciones semiáridas y variaciones extremas de caudal (de 0 a 2 m³/h). La metodología abarcó la caracterización hidroquímica y el modelado hidráulico mediante la Ley de Darcy. Los resultados establecen el uso de un sustrato orgánico local y proyectan un Tiempo de Retención Hidráulica de 22 días para compensar la baja cinética bacteriana en climas fríos, garantizando la saturación anóxica permanente mediante dispositivos de control de nivel. Se concluye que la implementación del biorreactor es una estrategia viable para reducir los sulfatos a <300 mg/L, proponiendo un modelo técnico sostenible para la remediación de pasivos hídricos en la minería no metálica boliviana.

Palabras Clave

Drenaje neutro contaminado, minería de yeso, tratamiento pasivo, pasivos ambientales.

Abstract

Gypsum mining generates environmental liabilities that produce Contaminated Neutral Drainage (CND), an effluent rich in sulfates that is difficult to treat using conventional methods. This study designs a passive treatment system for the Milluni Quarry (Bolivia), whose effluent contains concentrations of sulfates (700 mg/L) and iron (2.80 mg/L) that exceed regulatory limits. Detailed engineering was applied to design a sulfate-reducing bioreactor adapted to semi-arid conditions and extreme flow variations (from 0 to 2 m³/h). The methodology included hydrochemical characterization and hydraulic modeling using Darcy's Law. The results establish the use of a local organic substrate and project a hydraulic retention time of 22 days to compensate for low bacterial kinetics in cold climates, ensuring permanent anoxic saturation through level control devices. It is concluded that the implementation of the bioreactor is a viable strategy for reducing sulfates to <300 mg/L, proposing a sustainable technical model for the remediation of water-related liabilities in Bolivian non-metallic mining.

Keywords Contaminated neutral drainage, gypsum mining, passive treatment, environmental liabilities.

Citación: Diaz A. (2025). Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 165-170

Introducción

La industria extractiva global enfrenta el desafío perpetuo de gestionar los efluentes líquidos generados por la exposición de minerales a la intemperie. Mientras que el Drenaje Ácido de Roca (DAR), originado por la oxidación de sulfuros metálicos, cuenta con décadas de investigación y protocolos estandarizados de mitigación (Neculita et al., 2007), la minería no metálica y de minerales industriales ha operado en un relativo vacío técnico y regulatorio. La extracción de rocas evaporíticas, como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita, da lugar a un fenómeno hidroquímico distinto conocido como Drenaje Neutro Contaminado (DNC) (Zeballos et al., 2017).

El DNC se caracteriza por presentar un pH en el rango de 6.5 a 8.5, pero con concentraciones ambientalmente tóxicas de sulfatos (SO_4^{2-}), dureza cálcica y, ocasionalmente, metales pesados o metaloides en solución que no precipitan a pH neutro (Gusek, 2002). En ecosistemas acuáticos, la hipersalinización por sulfatos altera la presión osmótica, afectando letalmente a las comunidades bentónicas y limitando severamente el uso del recurso hídrico para riego agrícola o consumo animal. En Bolivia, la carencia de instrumentos de gestión ambiental específicos para el cierre de canteras no metálicas ha derivado en la proliferación de pasivos mineros abandonados que lixivian continuamente sales hacia las cuencas hidrográficas (Cardenas Revilla, 2016).

La Cantera Milluni, en el municipio de Poroma, representa un caso de estudio representativo. Las operaciones extractivas a cielo abierto fragmentaron significativamente el macizo rocoso, incrementando exponencialmente el área superficial de contacto del yeso y las lutitas intercaladas con la escorrentía pluvial. Esto generó una degradación continua del Río Milluni, principal fuente de agua para las comunidades aledañas. Ante la inviabilidad económica de implementar y mantener sistemas de tratamiento activo (plantas de ósmosis inversa o precipitación química continua) en una cantera en fase de cierre, la ingeniería ambiental volcó su atención a las tecnologías de tratamiento pasivo.

Los Biorreactores Sulfato-Reductores se presentan como la alternativa más prometedora. Estos sistemas de base ecológica utilizan el metabolismo anaerobio de las bacterias sulfato-reductoras (BSR) para convertir el sulfato disuelto en sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual reacciona con los metales presentes para formar sulfuros metálicos insolubles (ej. FeS , ZnS) que quedan retenidos en el sustrato del reactor (Zagury et al., 2006). Sin embargo, el diseño de biorreactores en entornos andinos semiáridos enfrenta: temperaturas medias bajas que ralentizan la cinética enzimática bacteriana y regímenes de precipitación extremos que provocan fluctuaciones drásticas de caudal.

El presente artículo tiene como objetivo el diseño de ingeniería de un Biorreactor Sulfato-Reductor optimizado para el tratamiento del DNC en la Cantera Milluni. Se plantea la hipótesis de que mediante el ajuste matemático del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y la formulación de una matriz orgánica local, es posible diseñar un sistema pasivo capaz de tolerar periodos prolongados de estiaje sin mortandad bacteriana, garantizando la reducción teórica de los sulfatos por debajo de los límites normativos exigidos para la rehabilitación sostenible del área.

Materiales y métodos

Área de estudio y contexto hidrológico

La investigación se enmarca en la Cantera Milluni (Coordenadas UTM 20K 248075 E, 7917036 N), situada a 2,400 m.s.n.m. en la provincia Oropeza, departamento de Chuquisaca. Geológicamente, el depósito consiste en estratos de yeso intercalados con limolitas y lutitas rojas de la formación Cretácica. El clima regional es subhúmedo seco. Los registros meteorológicos locales indican una precipitación media anual de 560.9 mm, con un patrón de distribución marcadamente estacional. Esta característica define un comportamiento hidrológico intermitente en los drenajes de la cantera, estableciendo los parámetros críticos de diseño: un caudal máximo de diseño (Q_{max}) de 2 m^3/h durante los eventos de precipitación intensa

(diciembre a marzo) y un caudal mínimo (Q_{\min}) de 0 m³/h durante la época seca (mayo a septiembre). La temperatura media anual es de 14.9°C, descendiendo significativamente durante los meses de invierno

Caracterización hidroquímica

Para determinar la carga contaminante y la influencia directa del pasivo minero, se estableció un diseño de muestreo en el cuerpo receptor principal (Río Milluni) durante el periodo de estiaje. Se definieron dos estaciones de monitoreo estratégico:

- **P-01 (Aguas Arriba):** Ubicado antes de la zona de influencia de la cantera, representando la línea base o fondo geoquímico natural del área gipsícola.
- **P-02 (Aguas Abajo):** Ubicado inmediatamente después de la confluencia de las escorrentías provenientes de los frentes de explotación y botaderos de desmonte.

La recolección, preservación y transporte de las muestras se realizó bajo los protocolos de la Norma Boliviana NB-512. Los análisis de laboratorio incluyeron la determinación de Sulfatos (método turbidimétrico), Hierro total (espectrofotometría), Turbidez (nefelometría), Dureza Total, pH y Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Modelación y diseño del Biorreactor Sulfato-Reductor

El dimensionamiento del sistema de tratamiento pasivo se basó en los principios de flujo en medios porosos y la cinética de reducción biológica. El proceso de diseño se dividió en tres fases analíticas Formulación del Sustrato Reactivo:

Se diseñó una matriz porosa compleja orientada a proveer permeabilidad a largo plazo y una liberación sostenida de carbono orgánico disuelto (COD). La composición teórica incluye la fuente bacteriana (sedimentos de arroyo), neutralizador de pH (carbonato cálcico), fuente de nitrógeno (urea), medio poroso (arena tamizada entre 0,5 y 2 mm) y fuente de carbono (virutas de madera de arce, estiércol de aves de corral, compost de hojas, aserrín de abeto y etanol).

Se asumió una porosidad efectiva de diseño del 30% (0.30) para la mezcla

Cálculos de Dimensionamiento Hidráulico:

Se utilizó el caudal máximo de diseño ($Q_{\max} = 2$ m³/h o 48 m³/día) para dimensionar el volumen de vacíos necesario. El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) se proyectó utilizando la ecuación volumétrica estándar:

$$TRH = \frac{V \times \eta}{Q}$$

Donde V es el volumen total de la capa de sustrato en m³, η es la porosidad y Q es el caudal volumétrico. Se aplicó la Ley de Darcy ($Q = K \cdot A \cdot i$) para verificar que la conductividad hidráulica (K) de la mezcla orgánica permite el flujo vertical descendente sin generar un nivel freático superficial que supere el bordo libre de las celdas.

Estrategia de resiliencia al estiaje:

Para abordar la condición crítica de $Q = 0$ m³/h en la época seca, el diseño incluyó una configuración de plomería con descarga de nivel controlado (dispositivo tipo codo invertido o *Agri-Drain*) en el colector efluente, garantizando que el medio reactivo permanezca hidrológicamente saturado independientemente de la falta de influyente.

Resultados

Alteración hidroquímica del cuerpo receptor

Los resultados analíticos de laboratorio demuestran cuantitativamente el impacto de la exposición del material minero sobre la química del agua. En la Tabla 1 se exponen los parámetros críticos evaluados y su evolución a través del tramo de la cantera.

Tabla 1. Dinámica de la calidad del agua en el área de influencia (Río Milluni)

Parámetro Físicoquímico	Unidad	Aguas Arriba (P-01)	Aguas Abajo (P-02)	Límite Permisible (RMCH)	Incremento %
Sulfatos	mg/L	117.0	700.0	400.0	+498%
Hierro Total	mg/L	0.05	2.80	1.0	+5,500%
Turbidez	NTU	1.45	64.1	N/A	+4,320%
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	320.0	1,135.0	N/A	+254%
pH	Unidad	7.8	7.2	6.0 - 9.0	-7%
Sólidos Disueltos	mg/L	480.0	1,450.0	1,500.0	+202%

Los datos revelan que el cuerpo receptor ingresa a la concesión minera cumpliendo los estándares de calidad (P-01). Sin embargo, la lixiviación del pasivo genera un incremento masivo en la concentración de sulfatos (+498%), superando el límite permisible de 400 mg/L y confirmando la presencia de Drenaje Neutro Contaminado. Simultáneamente, el hierro experimenta un aumento anómalo (hasta 2.80 mg/L), sugiriendo la micro-oxidación de sulfuros presentes en la matriz de las lutitas. El incremento exponencial de la turbidez (de 1.45 a 64.1 NTU) refleja un intenso proceso de erosión y arrastre de finos desde los acopios de material de descarte no estabilizados

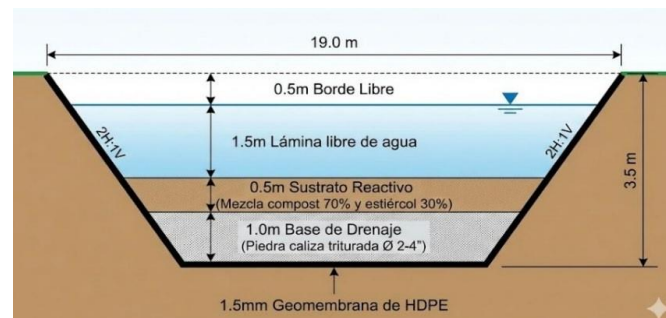
Parámetros de diseño del biorreactor

Para tratar la carga química observada en el punto P-02, el modelo de ingeniería proyectó la construcción de dos celdas de biorreacción operando en paralelo. Esta redundancia asegura la continuidad del tratamiento durante las operaciones de mantenimiento.

Los parámetros de diseño calculados arrojan las siguientes dimensiones métricas y volumétricas por celda:

- Área superficial activa: 263 m² por celda (526 m² totales).

- Perfil estratigráfico: Un espesor total útil de 1.5 metros, compuesto por una capa basal de drenaje de grava caliza de 1 m (para la recolección del efluente y soporte estructural) y una capa superior de sustrato reactivo orgánico de 0.5 m de espesor.
- Columna de agua superficial: Un tirante de agua permanente de 1.5 m sobre el sustrato para garantizar un sello hidráulico anaerobio e insolación térmica.
- Borde Libre (0.5 m): Como resguardo de seguridad para contención de eventos pluviométricos extremos.

Figura 1. Modelo conceptual de la celda de tratamiento pasivo – corte transversal

Bajo estas dimensiones y asumiendo la porosidad ($\eta = 0.30$), el volumen de vacíos efectivo disponible para el contacto agua-bacteria es capaz de asimilar el caudal máximo crítico de 2 m³/h (48 m³/día) manteniendo un tiempo de retención hidráulica teórico de 22 días. El diseño del sistema de descarga garantiza que durante los meses donde la precipitación es nula ($Q=0$), la columna de 1.5 m de sustrato y grava permanezca inundada a capacidad de campo, creando un ambiente biológicamente latente pero viable, gracias a la lámina de agua superficial (1.5 m) que absorbe la disminución por evaporación en los meses secos

Discusión

La estructuración del modelo de remediación hídrica para la Cantera Milluni requiere un análisis crítico de la viabilidad biotecnológica y sus implicaciones operativas.

Los resultados analíticos ratifican el diagnóstico primario: la Cantera Milluni no sufre de Drenaje Ácido, sino de un Drenaje Neutro Contaminado caracterizado por una hipersalinización de sulfatos (700 mg/L). La propuesta de diseño demuestra matemáticamente que la captura y derivación de estos caudales hacia un sistema de retención volumétrica de base orgánica (Biorreactor Sulfato-Reductor) posee la capacidad física para gestionar la totalidad de la carga efluente durante los picos máximos de precipitación, sentando las bases de una remediación pasiva sostenible.

El aspecto más distintivo del diseño radica en el cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH). La literatura internacional convencional, como los estudios de Neculita et al. (2007) y Gusek (2002), sugiere TRH en el rango de 5 a 10 días para sistemas operando en climas templados o de laboratorio. Sin embargo, el dimensionamiento para Milluni exige un TRH de 22 días. Esta desviación intencional del estándar responde a la termodinámica del sitio. Con una temperatura media anual de 14.9°C y mínimas invernales más bajas, la tasa de reducción biológica del sulfato se deprime severamente. Un TRH de 22 días asegura el tiempo de contacto extendido necesario para que el consorcio bacteriano logre metabolizar el oxígeno disuelto remanente, reducir el SO₄²⁻ y precipitar el hierro (que ingresa a 2.80 mg/L) en forma de monosulfuro de hierro (FeS), garantizando el cumplimiento de la meta de abatimiento a <300 mg/L.

El mayor reto biotecnológico en la minería andina no es el tratamiento del agua, sino la supervivencia del sistema cuando no hay agua. La precipitación local de 560.9 mm impone un régimen donde el caudal cae a 0 m³/h durante al menos cuatro meses.

En biorreactores convencionales, la falta de influyente provoca el secado del sustrato, la invasión de oxígeno (aerobiosis) y la muerte masiva de las bacterias sulfato-reductoras, oxidando además los metales previamente retenidos. El diseño hidrodinámico propuesto soluciona este quiebre al incorporar un codo de retención (tipo Agri-Drain). Este aporte conceptual transforma al reactor de un sistema de flujo continuo a un sistema de discontinuidad controlada (batch en estiaje), manteniendo la anoxia y protegiendo el inóculo en estado de latencia hasta la reactivación por las primeras lluvias primaverales.

Desde la perspectiva de la gestión territorial, la estandarización de estos diseños representa un salto cualitativo para la minería de áridos y evaporitas en Bolivia. El Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM) exige la mitigación de pasivos, pero sus guías técnicas están históricamente sesgadas hacia el tratamiento de la minería estannífera y argentífera. Demostrar la viabilidad del diseño de biorreactores con sustratos locales de bajo costo (estiércol, aserrín) provee a las autoridades (Ministerio de Minería y Metalurgia, Gobiernos Departamentales) de una herramienta técnica accesible para exigir cierres ambientales viables a cooperativas y pequeñas empresas no metálicas.

Es imperativo reconocer el carácter predictivo y proyectual de este trabajo. Los parámetros establecidos, incluyendo el TRH de 22 días y la eficiencia teórica de remoción, son estimaciones basadas en modelos cinéticos empíricos (Ley de Darcy y volumetría). La química real de las mezclas orgánicas complejas es altamente variable. Ciertas limitaciones operativas, como la potencial colmatación por la precipitación masiva de carbonatos (debido a la alta dureza de 1,135 mg/L), no pueden ser descartadas únicamente mediante modelación matemática y requieren validación empírica.

Para transitar del diseño conceptual a la construcción a escala real, la línea de investigación debe avanzar hacia la etapa de pilotaje.

Se recomienda la construcción inmediata de reactores de columna (escala bench) o mesocosmos in situ operando con el sustrato orgánico local formulado, sometidos a las fluctuaciones térmicas reales de Milluni. Asimismo, se requieren estudios de trazadores conservativos para determinar la hidrodinámica interna y descartar fenómenos de cortocircuito hidráulico dentro del sustrato. La gestión del Drenaje Neutro Contaminado en canteras de yeso ha sido históricamente subestimada, permitiendo la degradación silenciosa de las cuencas receptoras. El diseño del Biorreactor Sulfato-Reductor propuesto demuestra que, mediante la integración de la hidrología y la biotecnología pasiva, es posible diseñar infraestructuras ecológicas que neutralicen la contaminación química a largo plazo. Adaptar la ingeniería a las restricciones climáticas de la región andina es el paso fundamental para transformar los pasivos mineros irreversibles en sistemas controlados y ecológicamente seguros.

Conclusiones

La caracterización hidroquímica espacial de la Cantera Milluni confirma la existencia de un frente de contaminación activa, caracterizado como Drenaje Neutro Contaminado, con incrementos críticos de sulfatos (700 mg/L) y turbidez originados en las áreas de explotación expuestas. El diseño de ingeniería de detalle del Biorreactor Sulfato-Reductor establece que una configuración de flujo vertical descendente con 526 m² de área activa y 1.2 m de sustrato orgánico es capaz de gestionar el caudal crítico de 2 m³/h generado en los eventos máximos de precipitación local. La modelación matemática justificó la adopción de un tiempo de retención hidráulica extendido de 22 días como medida técnica compensatoria frente a las limitaciones de la cinética bacteriana en climas fríos (14.9°C), optimizando las condiciones para la reducción metabólica de los sulfatos. La integración de mecanismos de saturación forzada en el diseño asegura la resiliencia del consorcio microbiano anaerobio frente a la estacionalidad extrema de la zona, permitiendo la supervivencia del sistema durante los prolongados periodos de caudal nulo

Referencias

- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
- Cardenas Revilla, A. (2016). *Mine closure experiences—Bolivia, South America*. 707-714. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1608_52_Cardenas.
- Gusek, J. J. (2002). Sulfate-reducing bioreactor design and operating issues: Is this the passive treatment technology for you? *Mine Water and the Environment*, 21(2), 97-101.
- Hedin, R. S., Nairn, R. W., & Kleinmann, R. L. P. (1994). *Passive treatment of coal mine drainage* (Information Circular 9389). U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Neculita, C. M., Zagury, G. J., & Bussièrè, B. (2007). Passive Treatment of Acid Mine Drainage in Bioreactors using Sulfate-Reducing Bacteria: Critical Review and Research Needs. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 1-16. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0066>
- Sekarjannah, F. A., Mansur, M., & Abidin, Z. (2021). Selection of organic materials potentially used to enhance bioremediation of acid mine drainage. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(3), 2779-2789. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.083.2779>
- Zagury, G. J., Kulnieks, V. I., & Neculita, C. M. (2006). Characterization and reactivity assessment of organic substrates for sulphate-reducing bacteria in acid mine drainage treatment. *Chemosphere*, 64(6), 944-954
- Zeballos, A., Weihed, P., Blanco, M., & Machaca, V. (2017). Characterization of some nonmetallic resources in Bolivia: An overview of their potentiality and their application in specialized formulations. *Environmental Earth Sciences*, 76, 754. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7096-1>