



Evaluación de la roca estéril para la mitigación de drenajes ácidos de mina: un enfoque de economía circular

Oscar Alberto Muñoz Aguirre

Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor en Desarrollo Sostenible

Directora: Gloria María Restrepo Franco Doctor (PhD)

Codirector: Nelson Rodríguez Valencia Doctor (PhD)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas
Doctorado en Desarrollo Sostenible
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Muñoz-Aguirre, 2025)
Referencia	Muñoz Aguirre, O. A. (2025). Evaluación de la roca estéril para la mitigación de drenajes ácidos de mina: un enfoque de economía circular [Tesis doctoral]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Doctorado en Desarrollo Sostenible, VII

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Biosistemas Integrados.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A Daniel y Jenny, mi hijo y mi esposa, razón de mi vida y fuerza que impulsa cada uno de mis pasos. Este logro es tan suyo como mío, porque en su amor encontré sentido, inspiración y la valentía necesaria para continuar aun en los momentos más desafiantes.

A mi madre, siempre presente en mi corazón, por su ejemplo, su ternura y la luz con la que ha guiado mi camino incluso en la distancia.

A mis hermanas Adriana, Marcela y Luisa, y a mis sobrinos Carolina, Manuela, María del Mar, Luis Miguel, Juanita y Santiago, quienes han creído en mí sin reservas. Su cariño incondicional ha sido refugio, fuerza y compañía en cada etapa de mi vida.

A mi cuñado Carlos, un verdadero hermano, cuyo apoyo ha estado conmigo en los días luminosos y en los difíciles, recordándome siempre el valor de la lealtad y la fraternidad.

A mis abuelos, cuyo ejemplo de vida honesta, laboriosa y noble sembró en mí la convicción de que todo esfuerzo tiene sentido cuando se hace con amor y rectitud.

A mi tía Teresita y primo Alberto, definitivos en el inicio de mi vida universitaria.

Y a mis amigos, la legión de ángeles clandestinos.

A todos ustedes, con gratitud eterna, dedico este trabajo.

Agradecimientos

Expreso mi más profundo agradecimiento al Grupo Empresarial Damasa, patrocinador de esta investigación doctoral a través de sus compañías mineras Navas S.A.S. y Standard Gold, cuyo respaldo permitió el desarrollo técnico, científico y operativo de este trabajo. Extiendo también un reconocimiento especial a Cenicafé, por su valioso aporte en el diseño experimental y en la ejecución de los ensayos de neutralización, fundamentales para la consolidación de los resultados aquí presentados.

Manifiesto mi sincera gratitud a la doctora Gloria María Restrepo Franco, directora de esta tesis, por su guía constante, su rigor académico y sus precisas observaciones, que enriquecieron de manera excepcional cada etapa del proceso investigativo. Al doctor Nelson Rodríguez Valencia, por compartir generosamente su conocimiento y por sus invaluable aportes en la dimensión experimental y en el enfoque conceptual de esta investigación. De igual manera, agradezco al doctor Diego Hernández García por su acompañamiento, dirección y apoyo durante la pasantía doctoral, etapa determinante para ampliar la perspectiva técnica y metodológica del estudio.

Mi reconocimiento especial al ingeniero Julio Erazo Córdoba, por su apoyo incondicional, su confianza permanente y su infinita paciencia durante todo mi proceso de formación posgradual.

Finalmente, agradezco al colectivo de investigación en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales, cuyas discusiones, aportes y colaboraciones contribuyeron de manera significativa a dar forma y solidez a esta investigación doctoral.

Contenido

Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema	14
1.1. Generación de drenajes ácidos de mina: una amenaza persistente	14
1.2. Estériles mineros: un pasivo con potencial de recurso.....	15
1.3. Implicaciones socioambientales y éticas	17
1.4. Evidencia internacional del problema	18
1.5. Vacíos científicos y normativos	19
1.6. Pregunta de investigación.....	21
1.7. Antecedentes	21
1.7.1. Línea de tiempo sobre los estudios asociados al Drenaje Ácido de Mina	22
2. Justificación.....	27
2.1. Pertinencia con las políticas públicas globales.....	27
2.2. Pertinencia con las políticas públicas nacionales	27
2.3. Pertinencia académica con la línea de investigación y el Doctorado en Desarrollo Sostenible	28
2.4. Pertinencia técnica.....	29
2.5. Enfoque propuesto.....	29
3. Objetivos	30
3.1. Objetivo general	31
3.2. Objetivos específicos.....	31
4. Hipótesis.....	32
4.1. Hipótesis de trabajo	32
4.2. Hipótesis nula (H ₀)	32
5. Marco teórico	33

5.1. Teorías de sistemas integrados y fundamentos de la economía circular	33
5.2. Fundamentos geoquímicos y ambientales del drenaje ácido de mina (DAM).....	34
5.3. Mecanismos geoquímicos de neutralización y control del DAM	35
5.4. Ejes teóricos de la investigación	35
5.5. Síntesis integradora	40
6. Metodología	43
6.4.3. Integración de criterios científicos y económicos	52
7. Resultados y discusión.....	53
7.2.2. Ensayo 2. Remoción metales pesados de los drenajes ácidos de mina	62
7.3. Valoración de la viabilidad técnica y económica de la neutralización y remoción de metales pesados de drenajes ácidos de mina con roca residual.....	69
7.3.4. Síntesis técnica	73
8. Conclusiones	80
9. Recomendaciones.....	82
9.1. Caracterización de la roca como material neutralizante.....	82
9.2. Impacto del tratamiento con roca residual en las concentraciones de metales pesados de los drenajes ácidos de mina.....	82
9.3. Viabilidad técnica y económica de la propuesta.	82
9.4. Recomendaciones Integradas para la Sostenibilidad	82

Lista de tablas

Tabla 1. Concentración de metales en Drenajes Ácidos de Mina.	15
Tabla 2. Descripción de tratamientos evaluados en la capacidad de neutralización de la roca por lagunas de reacción.	48
Tabla 3. Descripción de tratamientos evaluados en la remoción de metales pesados de los drenajes ácidos de mina.....	50
Tabla 4. Contenido de Calcio en la roca estéril residual, determinación por Plasma Acoplado Inductivamente	55
Tabla 5. Comportamiento del pH en las lagunas de reacción, en los tratamientos evaluados.....	58
Tabla 6. Evolución de la acidez titulable (expresada en mL gastados de NaOH) en las lagunas de reacción. Ensayo 1.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Resumen de parámetros de neutralización de la roca por lagunas de reacción.....	61
Tabla 8. Porcentaje de remoción de metales pesados en los drenajes ácidos de mina.....	62
Tabla 9. Estadísticas descriptivas de remoción de metales en porcentaje por tratamiento.	63
Tabla 10. Resultados del análisis ANOVA de una vía para la remoción de cada metal.....	65
Tabla 11. Eficiencia de remoción de metales en tratamientos con vetiver.	67
Tabla 12. Estadísticos descriptivos de los tratamientos con vetiver.	67
Tabla 13. Puntuaciones multicriterio (escala 0–10).....	69

Lista de figuras

Figura 1. Apariencia del material en las diferentes granulometrías preparadas para el montaje del ensayo.....	47
Figura 2. Montaje establecido para la evaluación de la capacidad de neutralización de la roca. ..	48
Figura 3. Montaje establecido para la determinación de la depuración de metales pesados.	50
Figura 4. Evolución del pH en las lagunas de reacción de los tratamientos 1 y 2, para determinar la capacidad de neutralización de la roca estéril. Valores de pH obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.....	59
Figura 5. Evolución de la acidez titulable (expresada en mL de NaOH) en las lagunas de reacción de los tratamientos 1 y 2, para determinar la capacidad de neutralización de la roca estéril. Valores de pH obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.	60
Figura 6. Porcentaje de remoción de metales según tamaño de partícula. Valores obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.	63
Figura 7. Radar multicriterio estériles carbonatados (pasivo) y tratamientos activos.	69
Figura 8. Diagrama conceptual del sistema tampón carbonato–bicarbonato.....	72
Figura 9. Esquema conceptual del método de cámaras y pilares en minería subterránea.....	95

Resumen

La generación de drenajes ácidos de mina constituye un problema persistente que degrada la calidad del agua, moviliza metales pesados y aumenta la vulnerabilidad ambiental en zonas mineras activas y abandonadas. Frente a este contexto, el estudio planteó la necesidad de evaluar alternativas sostenibles basadas en material residual de la operación minera. El objetivo general de esta investigación consistió en evaluar la roca estéril para la mitigación de drenajes ácidos de mina, desde un enfoque de economía circular. La metodología se desarrolló en tres etapas: (i) caracterización geoquímica y mineralógica del estéril mediante ICP, ensayos con HCl y análisis petrográficos; (ii) evaluación experimental de tratabilidad, donde se cuantificó la remoción de Cu, Zn, As y Cd bajo diferentes granulometrías y (iii) análisis técnico-económico, comparando el desempeño del estéril con tratamientos activos. Los principales resultados demostraron que la roca estéril incrementó el pH, activó el sistema tampón carbonato-bicarbonato y logró remociones superiores al 90% para Cu y As, entre 70–82% para Cd y alrededor del 78% para Zn. Asimismo, el análisis económico evidenció ventajas significativas frente a insumos convencionales debido a su disponibilidad *in situ* y costo marginal. La investigación concluyó que la roca estéril calcoalcalina fue técnicamente eficaz y económicamente viable como insumo para sistemas pasivos de tratamiento de drenajes ácidos de mina, validando su potencial para transformar un pasivo ambiental en un recurso estratégico dentro de la economía circular minera.

Palabras clave: geoquímica, tratamiento pasivo, neutralización, minería responsable.

Abstract

The generation of acid mine drainage is a persistent problem that degrades water quality, mobilizes heavy metals, and increases environmental vulnerability in active and abandoned mining areas. In this context, the study raised the need to evaluate sustainable alternatives based on waste material from mining operations. The overall objective of this research was to evaluate waste rock for the mitigation of acid mine drainage, from a circular economy approach. The methodology was developed in three stages: (i) geochemical and mineralogical characterization of the waste rock using ICP, HCl assays, and petrographic analysis; (ii) experimental treatability evaluation, where the removal of Cu, Zn, As, and Cd was quantified under different particle sizes, and (iii) a techno-economic analysis, comparing the performance of the waste rock with active treatments. The main results demonstrated that the waste rock increased the pH, activated the carbonate-bicarbonate buffer system, and achieved removals exceeding 90% for Cu and As, between 70-82% for Cd, and around 78% for Zn. Furthermore, the economic analysis revealed significant advantages over conventional inputs due to its in-situ availability and marginal cost. The research concluded that the calc-alkali waste rock was technically effective and economically viable as an input for passive acid mine drainage treatment systems, validating its potential to transform an environmental liability into a strategic resource within the circular mining economy.

Keywords: geochemistry, passive treatment, neutralization, responsible mining.

Introducción

La minería sigue siendo una de las principales actividades económicas que impulsan el desarrollo en numerosas regiones del mundo, sobre todo en aquellos países con abundantes recursos minerales. Sin embargo, junto a su relevancia productiva, esta industria ocasiona impactos ambientales de gran magnitud, siendo uno de los más preocupantes el Drenaje Ácido de Mina (DAM). Este tipo de contaminación, bien documentada en la literatura científica (Chang et al., 2023; Lottermoser B., 2022), es originada cuando minerales con sulfuros en su estructura cristalina reaccionan con agua y oxígeno, generando efluentes de pH muy bajo y con elevadas concentraciones de metales pesados disueltos. Estas descargas pueden degradar la calidad de aguas superficiales y subterráneas, alterando ecosistemas acuáticos y terrestres, y afectando la salud humana de forma directa o indirecta.

La situación se complica en contextos donde la fiscalización ambiental es débil o las tecnologías de manejo de residuos resultan insuficientes. Las minas subterráneas, por sus condiciones anóxicas y complejas estructuras geológicas (Lottermoser B., 2022), presentan desafíos adicionales para cualquier intento de remediación posterior al cese de operaciones. Un cierre inadecuado deja expuestos materiales reactivos que seguirán generando acidez y liberando metales por décadas. Nordstrom y Alpers (2020) advierten que, sin tratamientos constantes, la contaminación por DAM puede prolongarse más de un siglo, lo que implica una carga técnica y financiera considerable. Además, los métodos convencionales requieren insumos costosos y un suministro continuo de energía, lo que limita su viabilidad a largo plazo en zonas con recursos escasos.

Este trabajo doctoral propone una alternativa de remediación ambiental basada en el uso de roca estéril residual generada por la propia minería como agente neutralizante del DAM. En particular, se plantea aprovechar materiales calcoalcalinos, ricos en carbonatos y silicatos, capaces de elevar el pH de las aguas ácidas y al mismo tiempo, inmovilizar metales mediante precipitación y adsorción. La propuesta no solo busca mitigar la contaminación, sino que incorpora un enfoque de economía circular al dar valor a un desecho inutilizado. Su aplicación en sistemas pasivos de neutralización representa una innovación técnica y conceptual, transformando un pasivo ambiental en un insumo útil para la restauración ecológica.

La investigación se respalda en estudios recientes que demuestran la efectividad de materiales carbonatados y silicatados en la neutralización de acidez y la captura de metales. Chang et al. (2023) señalan que la aplicación de roca calcoalcalina en sistemas pasivos puede elevar de forma sostenida el pH del drenaje ácido y reducir notablemente metales como hierro, manganeso, arsénico y cadmio. A partir de estas evidencias, se plantea la hipótesis de que la roca estéril residual, bajo ciertas condiciones físico-químicas y de diseño, es técnicamente viable como agente de tratamiento de DAM.

En el plano teórico, la investigación se sitúa en la intersección entre geoquímica ambiental, gestión de residuos mineros y sostenibilidad hídrica. Esta perspectiva integral considera no solo aspectos técnicos, sino también principios éticos, sociales y ecológicos, reconociendo el acceso al agua limpia como un derecho humano, conforme a la ONU (2010) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6. La contaminación por DAM vulnera directamente este derecho, al impedir el acceso a un recurso vital para la salud, la producción de alimentos y la preservación de los ecosistemas. La OMS (2021) subraya que la presencia de metales pesados en fuentes destinadas al consumo humano representa una amenaza grave para la salud pública en zonas mineras.

Con esta tesis se busca contribuir a enfrentar dicha amenaza mediante una solución asequible, escalable y apoyada en recursos locales. A diferencia de otras tecnologías costosas o complejas, el uso de roca estéril residual puede integrarse a las prácticas de cierre de mina, reduciendo gastos y facilitando la participación comunitaria en la gestión del agua. Además, al reutilizar un material ya disponible, se evita el impacto de extraer o transportar insumos externos, fortaleciendo así la sostenibilidad del proceso.

En el ámbito académico, este estudio aporta un enfoque original que combina mineralogía, hidro-geoquímica y economía circular en una propuesta sólida y socialmente pertinente. Sus resultados podrían aplicarse a otros contextos mineros y contribuir al diseño de políticas públicas sobre gestión de residuos y protección del agua. La validación del modelo mediante pruebas de laboratorio y simulaciones a escala piloto permitirá evaluar tanto la eficacia técnica como los beneficios ambientales, reforzando su viabilidad como solución replicable.

Asimismo, el proyecto se inserta en el debate sobre la transición hacia una minería más sostenible, que asuma la responsabilidad de restaurar los territorios intervenidos y minimice su huella ambiental. La revalorización de la roca estéril como neutralizante del DAM ejemplifica

cómo los principios de sostenibilidad pueden traducirse en acciones concretas y científicamente fundamentadas.

En síntesis, la presente tesis se propuso evaluar el uso de roca estéril calcoalcalina como estrategia de tratamiento pasivo de drenajes ácidos en minas subterráneas, bajo un enfoque de economía circular y sostenibilidad. Para ello, se definen objetivos que abarcan desde la caracterización mineralógica de la roca y el análisis del DAM, hasta el diseño experimental, modelación de la eficacia y estimación de beneficios socioambientales, con el propósito de generar un modelo replicable y científicamente validado que aporte soluciones locales a desafíos globales como el acceso al agua limpia y la reducción de pasivos ambientales.

Esta propuesta investigativa se presenta para optar al título de Doctor en Desarrollo Sostenible, adscrito a la línea de investigación en Biosistemas Integrados de la Facultad de Economía y Ciencias Contables de la Universidad de Manizales.

1. Planteamiento del problema

La minería metálica subterránea es una de las actividades extractivas más relevantes en regiones con yacimientos minerales de alto tenor (alto contenido de metales) y gran profundidad. A diferencia de la minería a cielo abierto, esta modalidad permite acceder selectivamente a depósitos minerales profundos, reduciendo la afectación superficial directa; sin embargo, implica desafíos geotécnicos, hidrogeológicos y ambientales significativos. En Colombia, la minería metálica subterránea es especialmente empleada para la extracción de oro y plata en zonas como Antioquia y el nordeste del país, donde la geología mineralizada favorece su aprovechamiento subterráneo. En el distrito minero Segovia Remedios se han documentado 243 minas entre activas y abandonadas (Muñoz & Restrepo, 2022) y de acuerdo con un estudio de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2024), Antioquia, es el mayor productor de oro en Colombia.

Dentro de los métodos utilizados para la explotación subterránea, el de cámaras y pilares se destaca por su simplicidad operativa y adaptabilidad a diferentes geometrías de yacimiento (Brady & Brown, 2004; Hustrulid & Bullock, 2001; Pérez-Flores et al., 2019; Li et al., 2021). Este método consiste en excavar cámaras interconectadas dejando pilares de mineral que sostienen el techo. Aunque eficiente, conlleva un proceso de inundación post-cierre cuando cesa el bombeo y la mina queda por debajo del nivel freático, lo que propicia la generación de drenajes ácidos de mina (DAM) (Younger, 2001; Wolkersdorfer, 2022). Este fenómeno se ve agravado por la gran superficie expuesta al oxígeno y al agua, intensificando la oxidación de minerales sulfurados y la liberación de metales pesados (Harries et al., 2020).

1.1. Generación de drenajes ácidos de mina: una amenaza persistente

El drenaje ácido de mina (DAM) constituye uno de los impactos ambientales más persistentes asociados a la actividad minera, debido a su capacidad para generar efluentes con pH extremadamente bajo y altas concentraciones de metales pesados. Su origen está asociado a la oxidación de minerales sulfurados, especialmente pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS) y esfalerita (ZnS), procesos que liberan protones, sulfatos y metales disueltos que deterioran ecosistemas acuáticos (Nordstrom et al., 2015).

Reportes internacionales documentan valores de pH entre 2,0 y 4,0 y en casos extremos valores entre 0,5 y 1,5 en drenajes de minas sulfuradas en España, Alemania y Canadá (Moncur et al., 2005; Akcil & Koldas, 2006). Estas condiciones facilitan la solubilización de metales y metaloides tóxicos. En la Tabla 1, se presentan los rangos típicos reportados en la literatura científica. Estas concentraciones superan ampliamente los valores guía de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que recomienda límites de 0,01 mg/L para Cd, 0,2 mg/L para Mn y 0,05 mg/L para As. En muchos casos, los drenajes ácidos exceden estas cifras por factores de 100 a 10.000 veces.

Tabla 1. Concentración de metales en Drenajes Ácidos de Mina.

Metal / Parámetro	Rango reportado (mg/L)	Referencia
Hierro (Fe)	100–20.000	Nordstrom et al., (2015); Méndez et al., (2022)
Aluminio (Al)	10–3.000	Akcil & Koldas, (2006)
Zinc (Zn)	1–3.000	Moncur et al., (2005)
Cobre (Cu)	0,1–500	Méndez et al., (2022)
Manganeso (Mn)	10–3.500	Skousen, (2017)
Sulfatos (SO₄²⁻)	1.000–20.000	Nordstrom et al., (2015)
Arsénico (As)	0,05–50	Akcil & Koldas, (2006)
Cadmio (Cd)	0,01–10	Moncur et al., (2005)

El DAM se considera un problema crítico porque degrada cuerpos de agua superficiales y subterráneos, moviliza metales carcinogénicos (As, Cd, Pb), destruye hábitats acuáticos, afecta suelos agrícolas y genera costos elevados de tratamiento. Canadá y Estados Unidos reportan más de US\$ 2.000 millones al año en manejo de DAM en minas cerradas (EPA, 2020). Su persistencia puede extenderse por décadas o siglos debido a procesos autocatalíticos mediados por bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que aceleran la oxidación férrica. En conjunto, estos factores justifican la necesidad urgente de soluciones sostenibles y de economía circular, como la utilización de materiales calcoalcalinos locales para el tratamiento del DAM.

1.2. Estériles mineros: un pasivo con potencial de recurso

Los estériles mineros constituyen uno de los pasivos ambientales más voluminosos generados por la industria extractiva. Se estima que entre el 70 y 99% del material extraído en minería metálica termina convertido en residuos, principalmente estériles, relaves y material de

cobertura (European Commission, 2017). A escala global, el volumen de residuos mineros acumulados supera los 100.000 millones de toneladas y cada año se generan más de 10.000 millones de toneladas adicionales (UNEP, 2021).

En minas subterráneas, los estériles provenientes del desarrollo de galerías y cámaras de explotación se depositan históricamente en botaderos cercanos a bocaminas, conformando cuerpos expuestos a meteorización e interacciones geoquímicas que pueden contribuir a la generación de DAM cuando contienen fracciones sulfuradas. No obstante, una parte significativa de estos estériles, especialmente los derivados de litologías carbonatadas o calcoalcalinas, posee propiedades geoquímicas que les confieren un potencial valioso para la neutralización de acidez y la inmovilización de metales.

Estudios internacionales han demostrado que materiales con contenido de calcita, dolomita y silicatos alcalinos presentan capacidades neutralizantes comparables a enmiendas comerciales utilizadas para tratar DAM. García-Valero et al. (2020) evidenciaron que materiales locales con 10–25% de CaO pueden reducir acidez y precipitar Fe, Al y metales traza. Skousen (2017) reportó que residuos con capacidad de neutralización ácida (ANC) mayores a 30–40 kg CaCO₃/t pueden sostener procesos de neutralización prolongados.

A nivel global, la valorización de estériles se alinea con la economía circular minera. La Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022) señala que reutilizar residuos mineros podría reducir entre 20–30% los costos de remediación y cierre. Proyectos piloto en Canadá, Australia y Finlandia han demostrado reducciones de 35–60% en costos frente a tratamientos activos o insumos importados (ICMM, 2020).

En Colombia, estimaciones del Ministerio de Minas y Energía indican que se generan entre 150 y 200 millones de toneladas de estériles por año, especialmente en minería de oro y carbón. En regiones como Marmato y Segovia-Remedios, gran parte de estos estériles proviene de litologías carbonatadas con alto potencial neutralizante. Sin embargo, su aprovechamiento aún es limitado debido a la falta de lineamientos técnicos y protocolos normativos.

En suma, los estériles mineros, tradicionalmente considerados un pasivo, representan un recurso estratégico capaz de aportar soluciones de bajo costo y alta sostenibilidad para el tratamiento del DAM, fortaleciendo un enfoque de minería circular y restauración ambiental.

1.3. Implicaciones socioambientales y éticas

El DAM trasciende el ámbito técnico ya que es un problema de responsabilidad ambiental y ética social en los territorios mineros. Desde el ámbito ambiental, el DAM genera aguas altamente ácidas que transportan sulfatos y metales pesados hacia ecosistemas superficiales y subterráneos, afectando la calidad del agua, alterando comunidades biológicas y degradando la funcionalidad ecológica. Según Nordstrom, Blowes y Ptacek (2015), la persistencia del DAM puede extenderse durante décadas o siglos, especialmente en minas subterráneas inundadas, lo que evidencia la complejidad de su remediación. Estudios han documentado pérdidas de biodiversidad, incremento de organismos extremófilos y deterioro estacional de la calidad hídrica en distritos mineros contaminados. Gomes y Valente (2024) demostraron que el DAM incrementa el riesgo ecológico por elementos tóxicos y modifica la estructura de las comunidades acuáticas. Asimismo, Luís et al. (2021) evidenciaron que los ambientes extremadamente ácidos seleccionan microorganismos especializados, alterando las redes tróficas y disminuyendo la resiliencia ecosistémica.

Desde la dimensión socioambiental, el DAM afecta la seguridad hídrica, la agricultura y la salud pública, pues los metales disueltos pueden acumularse en suelos y cultivos. Masindi et al. (2022) advierten que los drenajes ácidos comprometen la disponibilidad de agua, deterioran servicios ecosistémicos y generan tensiones sociales en comunidades rurales. La UNESCO (2017) señala que más del 80 % de las aguas residuales, incluyendo las de origen minero, se descargan sin tratamiento, lo que agrava riesgos sanitarios y ecológicos.

Casos como Zortman–Landusky en Montana evidencian la necesidad de tratamientos perpetuos debido a la generación sostenida de acidez, lo que plantea una problemática ética asociada a la justicia intergeneracional y a la distribución desigual de las cargas ambientales. Williams et al. (2009) destacan que comunidades indígenas continúan enfrentando los impactos, pese al cierre de la mina desde los años noventa.

En conjunto, estas implicaciones confirman que el DAM no solo es un problema técnico, sino un desafío ambiental, social y ético que amerita intervenciones urgentes basadas en sostenibilidad, economía circular y aprovechamiento de materiales locales como la roca estéril calcoalcalina.

Los estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y de organismos asociados evidencian que la exposición prolongada a metales pesados como plomo (Pb), cadmio

(Cd), arsénico (As), manganeso (Mn) y mercurio (Hg) genera efectos sanitarios ampliamente documentados, especialmente en poblaciones rurales vulnerables.

En cuanto a enfermedad cardiovascular, la OMS (2021) estima que la exposición al plomo ocasiona aproximadamente 900.000 muertes anuales por causas cardiovasculares. Adicionalmente, cerca del 30% de la carga mundial de hipertensión se relaciona con exposición crónica al plomo (OMS, 2021). En el caso del cadmio, niveles urinarios superiores a 1 $\mu\text{g/g}$ de creatinina incrementan entre 15% y 30% el riesgo de enfermedad coronaria (WHO, 2021).

Respecto a los efectos neurológicos, la OMS y UNICEF (2021) reportan que más de 800 millones de niños presentan niveles elevados de plomo en sangre, y que una exposición superior a 10 $\mu\text{g/dL}$ puede disminuir alrededor de 5 puntos del coeficiente intelectual (IQ). Por otro lado, el manganeso en agua con concentraciones superiores a 0,4 mg/L se ha asociado a reducciones del 8% al 11% en el desempeño cognitivo (WHO, 2021). El mercurio, incluso en dosis bajas, ocasiona alteraciones de memoria, atención y coordinación motriz, con incrementos de 25% a 40% en riesgo neurocognitivo (WHO, 2021).

En materia de enfermedad renal, la OMS indica que el cadmio es uno de los metales más nefrotóxicos: niveles urinarios superiores a 2 $\mu\text{g/g}$ de creatinina duplican la probabilidad de desarrollar enfermedad renal crónica (ERC). De forma similar, el consumo prolongado de agua con arsénico por encima de 10 $\mu\text{g/L}$ se asocia a incrementos del 30% al 50% en el riesgo de insuficiencia renal (WHO, 2021). El plomo, por encima de 15 $\mu\text{g/dL}$ en sangre, incrementa cerca del 60% el riesgo de nefropatía crónica.

En conjunto, estas cifras demuestran que la exposición a metales pesados constituye un riesgo sanitario de alta prioridad global, y que su mitigación, incluyendo la gestión de drenajes ácidos de mina, es una necesidad crítica en entornos rurales donde la vulnerabilidad es mayor.

1.4.Evidencia internacional del problema

Se estima que entre 20.000 y 50.000 minas abandonadas en el mundo generan DAM, afectando más de 6.000 km de ríos y hasta 16.000 km de quebradas (Behnaz & Austin, 2020). A escala internacional, el drenaje ácido de mina (DAM) se ha identificado como uno de los pasivos ambientales más persistentes y de mayor complejidad técnica dentro de la minería metálica. Su origen geoquímico, asociado a la oxidación de sulfuros y a la consecuente liberación de protones

y metales disueltos, ha generado impactos prolongados en sistemas hídricos superficiales y subterráneos, incluso décadas después del cierre de operaciones. De acuerdo con Nordstrom, Blowes y Ptacek (2015), la hidrogeoquímica del DAM puede mantenerse activa durante siglos, especialmente en minas subterráneas inundadas o con galerías colapsadas, donde la remediación resulta difícil y económicamente costosa.

Los estudios internacionales coinciden en que el DAM es responsable del deterioro progresivo de la calidad del agua, la alteración de ecosistemas acuáticos y la pérdida de biodiversidad. Gomes y Valente (2024) demostraron que, en distritos de sulfuros metálicos en Europa, el DAM ocasiona afectaciones estacionales en la calidad hídrica y un incremento en el riesgo ecológico por elementos tóxicos, causando cambios significativos en las comunidades biológicas. Estos resultados coinciden con la revisión de Luís et al. (2021), quienes evidenciaron que ambientes extremadamente ácidos seleccionan microorganismos especializados y modifican la estructura ecológica de cuencas impactadas.

Las implicaciones del DAM trascienden el ámbito ecológico para incluir riesgos socioambientales. Masindi et al. (2022) señalan que los drenajes con alta acidez y metales pesados comprometen la seguridad hídrica, afectan suelos agrícolas y generan tensiones sociales en comunidades dependientes de fuentes contaminadas. A nivel global, la UNESCO (2017) advierte que más del 80 % de las aguas residuales, incluidas las mineras, se descargan sin tratamiento, agravando la presión sobre ríos y acuíferos.

Casos emblemáticos como el complejo Zortman–Landusky, en Montana (Estados Unidos), muestran que el DAM puede requerir tratamientos activos perpetuos, décadas después del cierre minero, debido a los continuos procesos de acidificación y liberación de metales (Williams et al., 2009). Esto confirma que el DAM es también un desafío de gobernanza y justicia ambiental.

En conjunto, la evidencia internacional demuestra que el DAM compromete la integridad ecológica, la disponibilidad de agua, la salud pública y la sostenibilidad de territorios mineros. Este panorama refuerza la necesidad de estrategias técnicas basadas en economía circular y en el aprovechamiento de materiales locales como la roca estéril calcoalcalina.

1.5. Vacíos científicos y normativos

Pese a los avances en el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM), persisten vacíos científicos relevantes en la comprensión y aplicación de materiales calcoalcalinos, como ciertas rocas estériles residuales, como sustratos de remediación. La mayoría de estudios experimentales se ha concentrado en el uso de caliza comercial, subproductos industriales o humedales construidos, con evaluaciones de desempeño limitadas en el tiempo y bajo condiciones de laboratorio o piloto (Skousen, 2017; Naghoum et al., 2025).

Aún es limitada la evidencia sobre el comportamiento a largo plazo de matrices formadas por roca estéril calcoalcalina, particularmente en lo relativo a la cinética de disolución, formación de minerales secundarios, colmatación de poros, pérdida de capacidad neutralizante y respuesta frente a variaciones estacionales (García-Valero et al., 2020).

Asimismo, existen vacíos en la integración de enfoques de sostenibilidad y economía circular. Las revisiones recientes sobre tratamientos sostenibles destacan el potencial de sistemas pasivos combinados, pero señalan la falta de análisis de ciclo de vida (LCA), indicadores de circularidad y métricas que comparen tratamientos activos y pasivos basados en residuos locales (Masindi et al., 2022; Naghoum et al., 2025; García-Valero et al., 2020).

En el plano normativo internacional, aunque existen lineamientos para la predicción del DAM y la gestión de residuos, la regulación específica sobre la reutilización de residuos mineros como insumos de remediación sigue siendo incipiente (EPA, 2010; ITRC, 2025; Knowledge Gaps Report, 2024). Diversos análisis advierten barreras regulatorias que dificultan clasificar ciertos residuos como “recursos secundarios”, así como la ausencia de criterios para su uso seguro en restauración (European Commission, 2015; OECD, 2025; Kirchherr et al., 2017; Rizos et al., 2016).

En el contexto colombiano, si bien existen avances en lineamientos técnicos, persisten vacíos normativos. La cartilla sobre drenajes ácidos del Ministerio de Minas y Energía constituye un insumo orientador, pero no es un instrumento regulatorio de cumplimiento obligatorio. De igual forma, las guías de cierre de la ANLA incorporan principios de sostenibilidad, pero aún no establecen protocolos técnicos para la caracterización y uso de roca estéril calcoalcalina como insumo de tratamiento, ni criterios de desempeño a largo plazo (ANLA, 2022; ANLA, 2024).

Adicionalmente, estudios nacionales han señalado la ausencia de un marco regulatorio integral que abarque todas las fases del ciclo minero, especialmente en minas abandonadas, donde no existe un responsable operativo claro para la gestión de pasivos como el DAM (Ospina

Betancur, 2013). Aunque se han promulgado políticas sectoriales de economía circular, aún no existen instrumentos que integren explícitamente la revalorización de estériles como estrategia de remediación (Minenergía, 2020; MADS & Minenergía, 2021).

En síntesis, los vacíos científicos se relacionan con la falta de estudios aplicados y de largo plazo sobre el desempeño de rocas estériles calcoalcalinas como material neutralizante en condiciones reales. Los vacíos normativos se centran en la ausencia de marcos regulatorios específicos que promuevan y regulen su aprovechamiento seguro dentro de esquemas de economía circular y cierre minero.

1.6. Pregunta de investigación

¿Cuál es el grado de viabilidad y la eficiencia en la utilización de la roca estéril calcoalcalina residual como material neutralizante para el tratamiento de drenajes ácidos mineros (DAM) en minas subterráneas, y cómo esta aplicación influye en la disminución de la movilidad de metales pesados y la mejora de la calidad del agua, en el marco de una estrategia de economía circular y de gestión ambiental sostenible?

1.7. Antecedentes

El drenaje ácido de mina (DAM) constituye una de las externalidades ambientales más persistentes y complejas asociadas a la actividad minera, especialmente en contextos donde existe la presencia de sulfuros metálicos expuestos a la intemperie. Su generación, transporte y persistencia comprometen no solo la calidad del agua y del suelo, sino también la sostenibilidad de los ecosistemas circundantes y las condiciones de salud pública. En las últimas décadas, la literatura científica ha documentado un avance significativo en el desarrollo de tecnologías para la prevención, tratamiento y valorización de DAM, agrupadas en métodos activos y pasivos. Este apartado examina los antecedentes técnicos y científicos recientes sobre ambos enfoques, destacando sus fundamentos operativos, su efectividad en distintas condiciones geoclimáticas, así como su aplicabilidad en el marco del desarrollo sostenible de territorios mineros (Muñoz & Restrepo, 2024).

1.7.1. Línea de tiempo sobre los estudios asociados al Drenaje Ácido de Mina

1.7.1.1. Periodo histórico (antes de los 1990s): en este periodo se relacionaron las primeras descripciones de las dificultades asociadas a los DAM, igualmente se empezó a indagar sobre las primeras estrategias de tratamiento para estos.

Problema fundamental y origen del DAM: las actividades mineras de carbón y oro fueron históricamente percibidas como el pilar del crecimiento económico (Masindi et al., 2022). En este periodo el DAM se reconoció como uno de los problemas ambientales más significativos a nivel mundial, generado por la oxidación de sulfuros metálicos (principalmente pirita, FeS_2) cuando se exponen al aire y al agua (Kefeni et al., 2017; Rezaie & Anderson, 2020; Schwarz et al., 2020).

Tratamiento activo tradicional: los tratamientos industriales de DAM, utilizados rutinariamente por más de dos décadas en este periodo, a menudo experimentaron fallas y un rendimiento deficiente (Masindi et al., 2022). La estrategia principal frente a esta situación, fue el tratamiento activo basado en la neutralización alcalina continua, utilizando químicos industriales como la cal viva (CaO), cal hidratada (Ca(OH)_2) o caliza (CaCO_3) para elevar el pH y los precipitar metales (Kefeni et al., 2017; Rezaie & Anderson, 2020; Masindi et al., 2022).

Mecanismos de atenuación inicial: durante este periodo se evidenció que los efectos de mitigación del DAM por turberas dominadas por *Sphagnum* en condiciones naturales se reportaron por primera vez en Ohio y Virginia Occidental (Skousen et al., 2017).

1.7.1.2. Década de 1990: El impulso a los sistemas pasivos

Surgimiento del tratamiento pasivo: los sistemas de tratamiento pasivo (PTS por sus siglas en inglés) surgieron como una alternativa económica, ecológica y sostenible, especialmente para el tratamiento de minas abandonadas y sitios remotos, ya que requieren un consumo mínimo de energía y químicos, y poca supervisión (Skousen et al., 2017; Santos-Jallath et al., 2018; Torres et al., 2018; Laraguibel et al., 2020; Lounate et al., 2020; Masindi et al., 2022).

Las tecnologías geoquímicas pasivas, que se desarrollaron en este periodo son:

- Drenes Anóxicos de Caliza (ALD por sus siglas en inglés), como zanjas llenas de roca caliza triturada que operan bajo condiciones anóxicas para neutralizar la acidez y prevenir la oxidación del Fe_{2+} a Fe_{3+} (Genty et al., 2012; Santos-Jallath et al., 2018).
- Canales Abiertos de Caliza (OLC por sus siglas en inglés), empleados para tratar aguas óxicas donde la turbulencia evita el recubrimiento de la caliza por precipitados de hierro (Santos-Jallath et al., 2018; Labastida et al., 2019).
- Humedales de Flujo Vertical (VFW por sus siglas en inglés), también conocidos como Sistemas de Alcalinidad de Producción Sucesiva, que emplean un sustrato orgánico sobre caliza para consumir oxígeno y favorecer condiciones anóxicas antes de la neutralización (Skousen et al., 2017).

Reconocimiento de la biorremediación: se comenzó a estudiar el uso de Biorreactores Pasivos que empleaban bacterias sulfato-reductoras y materiales orgánicos como fuente de carbono para generar alcalinidad y precipitar metales como sulfuros metálicos (Kefeni et al., 2017; Ali et al., 2019; Ruehl et al., 2020; Lounate et al., 2020).

Limitaciones cimentadas: en este periodo se identificó que la caliza, si bien es el material más común, es vulnerable a la pasivación o endurecimiento (*hardpan*) superficial debido a la precipitación de hidróxidos de hierro o yeso, lo que reduce su reactividad y vida útil (Genty et al., 2012; Skousen et al., 2017; Santos-Jallath et al., 2018; Schwarz et al., 2020).

1.7.1.3. Mediados de los 2000s: Optimización y enfoque en la sostenibilidad

Introducción del sustrato alcalino sisperso: el concepto DAS (por sus siglas en inglés) se introdujo para superar el problema de obstrucción y pasivación en los sistemas de caliza convencionales (Rötting et al., 2006a; Rötting et al., 2006b; Rötting et al., 2008a). El DAS mezcla materiales alcalinos de grano fino (caliza o magnesita) con materiales inertes de grano grueso (como virutas de madera) para maximizar el área de reacción y la permeabilidad (Rakotonimaro et al., 2018; Laraguibel et al., 2020; Masindi et al., 2022). Se estableció que el DAS-magnesita (MgO) era particularmente eficiente para la remoción de metales divalentes (Zn, Mn, Cd, Ni, Co) al alcanzar

pH más altos (8,5–10,0) (Ali et al., 2019; Labastida et al., 2019; Laraguibel et al., 2020; Ramos-Pérez et al., 2022).

Evaluación del ciclo de vida: se comenzó a utilizar la metodología del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) (alrededor de 2008) para evaluar la sostenibilidad ambiental del tratamiento de DAM, comparando sistemas activos y pasivos (Calugaru et al., 2018; Masindi et al., 2022; Mahmoudi et al., 2024). Los estudios de LCA iniciales indicaron que los sistemas pasivos generalmente tenían un impacto ambiental menor, pero los sistemas activos eran más eficientes para grandes volúmenes (Kefeni et al., 2017; Calugaru et al., 2018; Masindi et al., 2022).

DAM como recurso: comenzó a percibirse el DAM como un recurso y se enfatizó la necesidad de explorar la valorización y recuperación de minerales y agua (Masindi et al., 2019a; Masindi et al., 2019b; Masindi et al., 2018; Masindi et al., 2022).

Tecnologías integradas en escala piloto (TRL 4-6): se desarrollaron y probaron a escala piloto tecnologías integradas (p. ej., Tshwane University of Technology Magnesium Barium Alkali- TUT MBA y Alkali based calcium-ABC) para la neutralización de DAM y la recuperación de minerales como sulfato de bario, hierro y brucita (Masindi et al., 2022).

1.7.1.4. Mediados de 2010s - Presente: economía circular y tecnologías avanzadas

Integración de Bicarbonato de Bario ($BaCO_3$): se demostró la eficacia del uso de witherita ($BaCO_3$) en sistemas DAS para lograr una remoción de sulfato casi completa, además de la remoción de metales divalentes, lo que representó un avance clave ya que los sistemas tradicionales no remueven sulfato eficientemente (Torres et al., 2018; Labastida et al., 2019; Laraguibel et al., 2020).

Recuperación de elementos críticos (REE/Y): se confirmó que los sistemas de remediación pasiva de DAM (DAS) son una fuente potencial para la recuperación de Elementos de Tierras Raras e Itrio (REE/Y), elementos críticos para las tecnologías modernas (Torres et al., 2018; Rodríguez-Galán et al., 2019; Orden et al., 2021; Masindi et al., 2022; Ahumada-Vargas, et al., 2025).

Nanomateriales y nanotecnología: el uso de nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI) se mostró efectivo para la remoción de metales tóxicos como arsénico y mercurio, y se apreció que la síntesis de nanopartículas de hierro a partir del propio DAM (como Fe_3O_4) es posible (Klimkova et al., 2011; Simeonidis et al., 2016; Alegbe et al., 2019).

Economía circular en sustratos: se validó el uso de residuos ricos en CaCO_3 de la industria agroalimentaria (como cáscaras de huevo y conchas de moluscos) como sustitutos sostenibles de la caliza en sistemas DAS, mejorando la huella ambiental del tratamiento (Laraguibel et al., 2020).

Descubrimiento de minerales secundarios en DAS: se identificó por primera vez la precipitación de malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) como una fase activa en la remoción de Cu en columnas CaCO_3 -DAS con baja relación Al/Cu y alta alcalinidad (Laraguibel et al., 2020).

Tecnologías híbridas avanzadas: se desarrollaron y probaron sistemas híbridos y electroquímicos a escala piloto, incluyendo la Electrocoagulación (EC) y la Membrana de Nanofiltración (NF), demostrando alta eficiencia para la recuperación de agua (H_2O), metales de alto valor (Cu, Zn, Co) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Kefeni et al., 2017; Brewster et al., 2020; Ahumada-Vargas, et al., 2025).

Gestión de residuos post-tratamiento (Sludge): se concluyó que los residuos sólidos generados por los PBR y PTS deben gestionarse mediante almacenamiento en condiciones saturadas/sumergidas o mezclados con residuos alcalinos para prevenir la oxidación de sulfuros y la liberación de contaminantes (drenaje neutral contaminado) (Jouini et al., 2019; Lounate et al., 2020).

Innovación en diseño pasivo (DES): se evaluaron sistemas como el Sistema de Intercambio Difusivo (DES por sus siglas en inglés) (ADES/SDES), que ofrecen mejor rendimiento en la protección de comunidades microbianas y en el mantenimiento de la permeabilidad en comparación con los desafíos del hardpan del DAS (Schwarz et al., 2020).

LCA en economía circular y carbono negativo: estudios recientes de LCA demostraron que la utilización de subproductos industriales alcalinos (como el polvo de acero) para el tratamiento de

DAM a través de la mineralización de CO₂ puede generar una huella de carbono negativa (Mahmoudi et al., 2024).

La revisión de antecedentes realizada evidencia una evolución tecnológica significativa en el tratamiento del DAM, con propuestas que transitan desde sistemas activos de alta eficiencia, pero alto costo operativo, hacia soluciones pasivas que integran principios de bio-remediación, circularidad de materiales y restauración ecológica. Si bien los tratamientos activos han demostrado gran capacidad de remoción de metales y recuperación de recursos, su sostenibilidad a largo plazo es cuestionable en contextos de baja escala o escaso financiamiento. Por su parte, los métodos pasivos han ganado relevancia por su bajo consumo energético y uso de materiales locales o residuales, aunque persisten retos asociados a la estabilidad, mantenimiento y eficiencia en condiciones extremas. Estas consideraciones refuerzan la necesidad de enfoques híbridos, interdisciplinarios y contextualizados, que permitan una transición hacia modelos mineros más responsables y compatibles con los objetivos del desarrollo sostenible. Sobre esta base, la presente investigación se posiciona dentro del campo emergente que busca optimizar tecnologías de remediación pasiva, con criterios de efectividad técnico-ambiental y viabilidad socioeconómica.

2. Justificación

Esta investigación doctoral se articula estrechamente con las políticas públicas ambientales vigentes, los lineamientos académicos en desarrollo sostenible y las estrategias técnicas de innovación aplicables al sector minero colombiano. Esta articulación no solo fortalece el sustento legal y técnico de la propuesta, sino que garantiza la alineación con las prioridades nacionales e internacionales en materia de sostenibilidad, gestión de recursos naturales y desarrollo territorial.

2.1. Pertinencia con las políticas públicas globales

La problemática de los drenajes ácidos de mina se enmarca en los grandes desafíos ambientales reconocidos a nivel internacional, tales como la degradación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y la contaminación hídrica. En este contexto, la investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas, especialmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

De igual forma, responde a los principios de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que promueve la transición hacia economías circulares, la protección de los recursos naturales y la restauración ecológica de áreas degradadas. La reutilización de materiales calco-alcalinos para la neutralización pasiva de drenajes ácidos constituye una estrategia técnica innovadora que contribuye a estas metas globales, fortaleciendo la resiliencia ambiental y reduciendo presiones sobre los ecosistemas.

2.2. Pertinencia con las políticas públicas nacionales

A nivel nacional, la investigación se inscribe en los principios establecidos en la Ley 99 de 1993, norma base de la política ambiental colombiana liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que promueve la gestión integral del ambiente y la restauración de los recursos naturales. De igual forma, el Decreto 2820 de 2010, que reglamenta las licencias ambientales, define lineamientos para la evaluación y cierre de proyectos mineros, ámbitos en los

cuales la propuesta aporta criterios técnicos útiles para fortalecer los estudios de impacto ambiental (EIA) mediante la incorporación de estrategias de tratamiento pasivo.

La investigación también se articula con la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), liderada por el MADS y el Departamento Nacional de Planeación (DNP), que promueve el cierre de ciclos productivos y la eficiencia en el uso de materiales. Al reutilizar estériles mineros en procesos de neutralización y restauración, se contribuye directamente a este enfoque circular.

También, la propuesta apoya las metas del Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas (PNR), que impulsa la recuperación de ecosistemas afectados por minería y otras actividades extractivas, y se relaciona con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), implementada por el MADS y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), al aportar soluciones concretas para proteger la calidad del agua y la seguridad hídrica.

Finalmente, la investigación contribuye al cumplimiento de la Política de Minería Responsable de la Agencia Nacional de Minería (ANM), orientada a prácticas mineras sostenibles y ambientalmente seguras, y se enmarca en los objetivos estratégicos del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 “Colombia Potencia Mundial de la Vida”, liderado por el DNP y la Presidencia de la República de Colombia, que prioriza la transición hacia una economía sostenible, la protección de la biodiversidad y la restauración ecológica.

2.3. Pertinencia académica con la línea de investigación y el Doctorado en Desarrollo Sostenible

La propuesta se alinea con los enfoques de innovación, sostenibilidad y economía circular promovidos en el marco del Doctorado en Desarrollo Sostenible, fortaleciendo la generación de conocimiento aplicado para enfrentar problemáticas ambientales complejas. La integración de principios de geoquímica ambiental, sistemas integrados y restauración ecológica responde a las tendencias contemporáneas de investigación transdisciplinaria, que buscan soluciones técnicas viables, escalables y alineadas con la sostenibilidad.

De igual forma, la investigación se proyecta como un aporte académico significativo al campo de la minería sostenible, al proponer modelos técnicos basados en la valorización de residuos mineros y su integración en procesos de restauración ambiental. Esto refuerza la

pertinencia institucional de la propuesta y su capacidad de incidir en la toma de decisiones públicas y privadas.

2.4. Pertinencia técnica

Desde el punto de vista técnico, la investigación plantea un modelo innovador de neutralización pasiva de drenajes ácidos de mina mediante la valorización de roca estéril residual con propiedades calco-alcalinas, integrando principios de geoquímica, ingeniería ambiental y sistemas integrados. Este enfoque permite reducir costos operativos frente a tratamientos activos, minimizar la generación de pasivos ambientales y promover la restauración ecológica de sitios impactados por minería.

La aplicación de tecnologías pasivas y materiales disponibles en sitio contribuye a mejorar la eficiencia técnica y económica de los procesos de tratamiento, ofreciendo soluciones viables para zonas mineras de pequeña y mediana escala, donde los costos de tratamiento suelen ser limitantes. Además, fortalece la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y terrestres al reducir las cargas contaminantes y facilitar procesos de rehabilitación ecológica.

2.5. Enfoque propuesto

Ante este escenario, la investigación plantea aprovechar roca estéril residual con afinidad calcoalcalina como agente neutralizante de DAM en minas subterráneas. Este enfoque permitiría:

- Reducir la movilidad de metales pesados.
- Mejorar la calidad del recurso hídrico.
- Disminuir pasivos ambientales.
- Promover minería circular y sostenible (Johnson & Hallberg, 2019; Simate & Ndlovu, 2021; Piatak et al., 2020).

2.6. Justificación económica y sostenibilidad financiera del tratamiento del DAM

Desde una perspectiva de desarrollo sostenible, la viabilidad de las alternativas de tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) no puede evaluarse únicamente por su eficacia geoquímica, sino también por su sostenibilidad económica en el tiempo. Estudios recientes han evidenciado que el tratamiento del DAM, especialmente en contextos de minas abandonadas o en fase de cierre, representa una carga financiera persistente debido a la necesidad de operación prolongada, consumo energético continuo y manejo de subproductos (Yang et al., 2023).

Los tratamientos activos convencionales, basados en la dosificación permanente de reactivos alcalinos, presentan una elevada eficiencia técnica inmediata, pero su sostenibilidad económica es limitada en el largo plazo debido a la dependencia de insumos externos, altos costos operativos (OPEX) y requerimientos institucionales continuos (Masindi et al., 2022). Estas condiciones generan lo que diversos autores denominan “costos perpetuos” del drenaje ácido, comprometiendo la viabilidad financiera de los territorios una vez finalizada la actividad minera.

En contraste, los sistemas pasivos y los enfoques basados en el aprovechamiento de materiales residuales locales han demostrado ventajas económicas y ambientales significativas, al reducir la dependencia de insumos externos y minimizar los requerimientos energéticos (Nguegang et al., 2025). En este marco, la utilización de roca estéril residual con propiedades calcoalcalinas se alinea con los principios de la economía circular, al transformar un pasivo ambiental en un insumo funcional para la mitigación del DAM.

En coherencia con el alcance de la presente investigación doctoral, la dimensión económica se aborda mediante una valoración económica preliminar de prefactibilidad, orientada a sustentar comparativamente la propuesta frente a tratamientos activos tradicionales, sin pretender sustituir un análisis financiero detallado propio de fases posteriores de ingeniería o inversión.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar la roca estéril para la mitigación de drenajes ácidos de mina, desde un enfoque de economía circular.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física, química y mineralógicamente la roca estéril residual generada en la explotación minera subterránea, con énfasis en su composición calcoalcalina y contenido de carbonatos para comprobar su efectividad como material neutralizante.
- Determinar el impacto del tratamiento con roca residual en las concentraciones de metales pesados de los drenajes ácidos de mina.
- Valorar la viabilidad técnica y realizar una valoración económica preliminar de la neutralización y remoción de metales pesados de drenajes ácidos de mina mediante el uso de roca estéril residual, desde un enfoque de economía circular.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de esta investigación se articula desde un enfoque geoquímico, ambiental y de sostenibilidad minera, bajo la premisa de que ciertos residuos generados por la actividad extractiva pueden cumplir funciones técnicas en procesos de remediación. En este marco, la hipótesis de trabajo se formula así:

“El uso de roca estéril residual con propiedades calcoalcalinas en sistemas pasivos de tratamiento permite disminuir significativamente el nivel de acidez y las concentraciones de metales pesados (Cd, As, Zn y Cu) en los drenajes ácidos generados por minas subterráneas, mejorando la calidad del recurso hídrico e incorporando principios de sostenibilidad y economía circular en el proceso de remediación ambiental”.

Este postulado se fundamenta en la revalorización de los residuos sólidos mineros — particularmente los estériles de composición carbonatada y silicatada—, los cuales presentan propiedades neutralizantes y capacidad de adsorción de metales pesados. Su utilización en sistemas pasivos de tratamiento permitiría replicar, de forma controlada, procesos geoquímicos naturales de atenuación, reduciendo los costos operativos y promoviendo prácticas circulares de cierre minero.

4.2. Hipótesis nula (H_0)

“El empleo de roca estéril residual con propiedades calcoalcalinas en sistemas pasivos de tratamiento no produce una disminución significativa en la acidez ni en la concentración de metales pesados disueltos en los drenajes ácidos de minas subterráneas, por lo cual no contribuye a mejorar la calidad del recurso hídrico ni a incorporar principios de sostenibilidad ni economía circular en el proceso de remediación”.

5. Marco teórico

El presente estudio se fundamenta en un enfoque interdisciplinario que articula los principios de la teoría general de sistemas, la geoquímica ambiental y la economía circular, con el propósito de formular una estrategia sostenible para la remediación del drenaje ácido de mina (DAM) mediante el aprovechamiento de roca estéril residual con afinidad calcoalcalina. Esta integración responde a la necesidad de transformar el paradigma extractivo tradicional, de carácter lineal y basado en la explotación, el uso y el descarte, hacia un modelo circular, en el cual los residuos mineros se reintroducen como recursos activos dentro de los procesos de restauración ambiental y cierre minero.

5.1. Teorías de sistemas integrados y fundamentos de la economía circular

La teoría general de sistemas, desarrollada por Bertalanffy (1968), sostiene que los sistemas no pueden analizarse únicamente a través de sus partes aisladas, sino por las relaciones entre ellas y su comportamiento dinámico. Este paradigma aún vigente, permite interpretar la minería como un sistema abierto cuyo desempeño ambiental depende de las interacciones entre la extracción, la transformación, la disposición de residuos y su entorno ecológico. "Las prácticas mineras convencionales, al ignorar estas interrelaciones, tienden a fragmentar el análisis ambiental, dificultando la identificación de soluciones sostenibles" (Allwood & Cullen, 2022).

La economía circular, por su parte, propone reconfigurar los sistemas de producción y consumo mediante estrategias que prolonguen la vida útil de los materiales, reduzcan la generación de residuos y optimicen los flujos de energía. "En la minería, este enfoque permite transitar hacia modelos donde los residuos, como los estériles, son revalorizados para funciones técnicas y ambientales" (Winans et al., 2022). Este principio se alinea con lo propuesto por la Fundación Ellen MacArthur (2019), que argumenta que los sistemas económicos deben emular los ciclos de la naturaleza, donde nada se desperdicia.

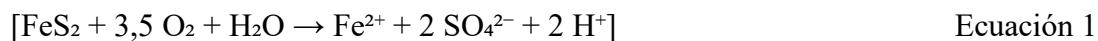
Aplicar un enfoque de sistemas integrados en el ámbito minero implica identificar puntos de conexión entre las etapas de exploración, explotación, beneficio, disposición y cierre, de modo que los subproductos y materiales residuales, como las rocas estériles o los relaves, puedan adquirir una función útil dentro del mismo sistema. Este cambio paradigmático da origen a la minería

circular, en la que la innovación tecnológica, la eficiencia material y la responsabilidad ambiental se articulan en un modelo coherente de desarrollo sostenible (European Commission, 2020; Iberdrola, 2023).

Desde esta perspectiva, la investigación plantea que la roca estéril calcoalcalina, considerada tradicionalmente un desecho, puede reintroducirse en el sistema minero como material reactivo para la neutralización del drenaje ácido, cerrando así un ciclo geoquímico dentro del propio ecosistema extractivo.

5.2. Fundamentos geoquímicos y ambientales del drenaje ácido de mina (DAM)

El drenaje ácido de mina (DAM) constituye uno de los pasivos ambientales más persistentes y complejos de la minería metálica. Su origen se encuentra en una serie de reacciones de oxidación–reducción (redox) que involucran minerales sulfurados, oxígeno y agua. Estas reacciones generan ácido sulfúrico y liberan metales disueltos, provocando una disminución drástica del pH en las aguas superficiales y subterráneas (Nordstrom, 2020; Wolkersdorfer, 2022). La reacción fundamental puede expresarse como se presenta en la Ecuación 1.



El hierro ferroso (Fe^{2+}) se oxida posteriormente a hierro férrico (Fe^{3+}), el cual actúa como agente oxidante adicional sobre la piritita, generando un ciclo autocatabólico que mantiene la acidez del medio. Este proceso se acelera por la acción de bacterias quimiolitotróficas como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*, que catalizan la oxidación del hierro y el azufre, intensificando la liberación de acidez y metales (Johnson & Hallberg, 2021).

Los principios geoquímicos que rigen este fenómeno incluyen (Blowes et al., 2014; Nordstrom & Alpers, 2020):

- Termodinámica de las reacciones redox, que define la estabilidad de las especies metálicas y sulfurosas.
- Cinética de disolución, que regula la velocidad de oxidación y la liberación de iones metálicos.

- Equilibrios ácido–base, que determinan la capacidad del sistema para amortiguar o neutralizar la acidez.
- Adsorción y precipitación de metales, procesos que controlan la movilidad y retención de contaminantes.

Comprender estos mecanismos es esencial para diseñar estrategias de mitigación geoquímica, basadas en la manipulación del pH, la alcalinidad y el potencial redox, con el fin de inmovilizar los metales y restablecer el equilibrio químico del medio acuático.

5.3. Mecanismos geoquímicos de neutralización y control del DAM

Los materiales calcoalcalinos poseen una composición mineralógica que les otorga una elevada capacidad de neutralización ácido–base. Minerales como la calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), feldspatos y silicatos de calcio y magnesio reaccionan con los iones hidrógeno (H^+) presentes en el drenaje ácido, aumentando el pH y favoreciendo la precipitación de hidróxidos y carbonatos metálicos (Stumm & Morgan, 2012; Pérez-López et al., 2021).

Ejemplo de reacción de neutralización: $[\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2]$

A medida que el pH se eleva, los metales disueltos (Fe, Cu, Zn, Pb, Mn) precipitan, reduciendo su movilidad y toxicidad. Estos procesos son altamente dependientes de la superficie específica, la granulometría, el tiempo de contacto y la mineralogía de la roca (Chang et al., 2023).

El aprovechamiento de rocas estériles calcoalcalinas como medio reactivo constituye una aplicación directa de la geoquímica ambiental, ya que integra el conocimiento científico con soluciones tecnológicamente viables y ambientalmente sostenibles. Este enfoque reduce los costos de tratamiento y convierte los residuos mineros en insumos útiles, materializando el principio de revalorización circular (Restrepo & Arroyave, 2023; European Commission, 2022).

5.4. Ejes teóricos de la investigación

5.4.1. Eje 1. Impacto ambiental del drenaje ácido de mina (DAM) en contextos de minería subterránea

El drenaje ácido de mina (DAM) representa uno de los pasivos ambientales más críticos asociados a la minería metálica, especialmente en explotaciones subterráneas donde la interacción entre roca mineralizada, agua y oxígeno es continua y prolongada. En este tipo de trabajos, las condiciones de humedad, temperatura y ventilación favorecen las reacciones de oxidación de minerales sulfurados, particularmente pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2), generando efluentes ácidos que movilizan metales pesados y sulfatos (Nordstrom, 2020; Wolkersdorfer, 2022).

En el contexto colombiano y latinoamericano, varias minas subterráneas operan bajo el método de cámaras y pilares, un sistema de explotación que consiste en la excavación de amplias cámaras donde se extrae el mineral, dejando pilares de roca sin minar para sostener la estructura superior (Hustrulid & Bullock, 2021). Este método, si bien garantiza la estabilidad geotécnica del macizo, presenta implicaciones ambientales significativas:

En primera instancia, genera una gran cantidad de roca estéril, ya que la relación promedio entre estéril y roca mineralizada suele ser de 3 a 1, producto de la necesidad de realizar labores de desarrollo, sostenimiento y ventilación (Rendon & García, 2020; Restrepo & Arroyave, 2023). Este material, al ser removido y expuesto a condiciones oxidantes, se convierte en un potencial generador de drenaje ácido, particularmente cuando contiene minerales sulfurados residuales.

Además, las galerías y cámaras actúan como vías preferenciales de flujo para el agua de infiltración, creando un sistema interconectado que facilita la dispersión del DAM hacia acuíferos y corrientes superficiales (Younger, 2023). En minas abandonadas o inundadas, la acumulación de aguas ácidas en los niveles inferiores constituye una fuente crónica de contaminación, capaz de persistir durante décadas incluso después del cierre de la mina.

Los impactos del DAM en este tipo de contextos se manifiestan en tres niveles principales:

- Geoquímico, por la liberación de protones (H^+) y metales pesados (As, Cd, Cu, Zn, Pb, Fe) que alteran el equilibrio ácido-base del sistema acuático.
- Ecológico, por la reducción de la biodiversidad y la alteración de hábitats acuáticos debido al descenso del pH y la toxicidad metálica.
- Socioambiental, por el riesgo que representa la contaminación del recurso hídrico para las comunidades aledañas (IDEAM, 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

La evidencia científica demuestra que la minería subterránea con método de cámaras y pilares, sin una adecuada gestión de sus estériles, incrementa la probabilidad de generación de DAM y compromete la calidad del agua en los sistemas hidrogeológicos regionales (Tiwarly & Dhar, 2022; Younger, 2023). En consecuencia, la investigación propone abordar este problema desde una visión geoquímica y sistémica, integrando los principios de la economía circular para reintroducir la roca estéril calcoalcalina como agente neutralizante dentro del mismo ecosistema minero, transformando un pasivo ambiental en un recurso restaurador.

5.4.2. Eje 2. Neutralización geoquímica de la acidez y retención de metales pesados

El control y neutralización del drenaje ácido de mina (DAM) requieren comprender la naturaleza de los procesos geoquímicos que regulan la acidez, la movilidad de los metales y las condiciones redox del sistema. En este contexto, los materiales calcoalcalinos, particularmente las rocas estériles ricas en carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, ofrecen un potencial significativo para la remediación pasiva, al actuar como agentes neutralizantes capaces de aumentar el pH y promover la precipitación de hidróxidos metálicos (Stumm & Morgan, 2012; Johnson & Hallberg, 2020).

Cuando los iones hidrógeno (H^+) del DAM reaccionan con minerales como la calcita ($CaCO_3$) o la dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), se produce una neutralización que disminuye la acidez y estabiliza químicamente la solución. A medida que el pH aumenta, los iones metálicos liberados (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+}) precipitan como hidróxidos, carbonatos o sulfatos básicos, inmovilizándose en el medio sólido (Chang et al., 2023). Este proceso reduce la toxicidad del drenaje y su capacidad de disolución de metales secundarios.

El aprovechamiento de rocas estériles calcoalcalinas representa, por tanto, una estrategia de minimización de impactos y valorización de residuos, coherente con el principio de cierre de ciclos de la economía circular. Además de su función neutralizante, estos materiales pueden actuar como soportes estructurales en sistemas de drenaje pasivo, mejorando la aireación y favoreciendo el desarrollo de biopelículas oxidantes que estabilizan los metales en fases menos solubles (Pérez-López et al., 2021).

En estudios recientes realizados en Europa, Asia y Latinoamérica, la aplicación de estériles calco-magnésicos ha demostrado eficiencias de neutralización superiores al 80% y una reducción de metales disueltos en más del 90% en condiciones controladas de laboratorio y campo (Zhao et

al., 2022; Restrepo & Arroyave, 2023). Estos resultados confirman la viabilidad técnica de un enfoque basado en reactivos naturales locales, en contraste con los tratamientos químicos convencionales de alto costo y baja sostenibilidad.

La integración de estos mecanismos dentro de una estrategia circular convierte el proceso de remediación en un ciclo regenerativo, en el que los residuos del sistema extractivo actúan simultáneamente como agentes de restauración geoquímica y elementos de cierre ambiental del propio sistema minero.

5.4.3. Eje 3. Economía circular y gestión sostenible de los residuos mineros

La economía circular surge como una alternativa al modelo lineal de “extraer–usar–desechar”, proponiendo un marco de regeneración sistémica que busca desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos (Korhonen et al., 2018; Geissdoerfer et al., 2017). Su aplicación en el sector minero implica reconfigurar los flujos de materiales, energía y agua, de modo que los residuos y subproductos sean reintroducidos en los procesos productivos o de restauración ambiental (European Commission, 2020).

En el contexto de la minería subterránea, los estériles calcoalcalinos y los relaves constituyen flujos materiales de alto potencial para la implementación de principios circulares. A través de tecnologías de segregación, caracterización y aprovechamiento geoquímico, es posible convertir pasivos ambientales en insumos funcionales para la remediación, la construcción o la recuperación de suelos degradados (MADS, 2019; CEPAL, 2020). Este enfoque permite reducir los volúmenes de disposición, minimizar la huella ecológica y prolongar el ciclo de vida útil de los materiales extraídos.

Desde una perspectiva de sistemas, la economía circular minera se sostiene sobre tres pilares:

- Cierre de ciclos de materiales, donde los residuos son transformados en recursos.
- Optimización energética, mediante la recuperación de energía en procesos de bombeo, ventilación o tratamiento.
- Innovación tecnológica y social, que promueve la corresponsabilidad ambiental de las empresas y comunidades (Iberdrola, 2023; Kirchherr et al., 2018).

La transición hacia una minería circular requiere además un soporte institucional y normativo que fomente la trazabilidad de materiales, la responsabilidad extendida del productor y la certificación de prácticas sostenibles. En Colombia, la Agencia Nacional de Minería (ANM, 2022) y el Ministerio de Ambiente (2023) han comenzado a incorporar estos principios en las políticas de cierre minero y revalorización de residuos, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 12 y 15).

En síntesis, la economía circular aplicada al contexto minero no solo busca reducir impactos, sino también restaurar la funcionalidad ecológica del territorio, integrando el conocimiento científico, la innovación tecnológica y la gobernanza ambiental en un mismo sistema regenerativo.

5.4.4. Eje 4. Derecho humano al agua y sostenibilidad ambiental

El agua constituye el eje articulador entre minería, ecosistemas y comunidades. Su protección trasciende el ámbito técnico para situarse en el plano ético y jurídico, reconocido por la Resolución 64/292 de las Naciones Unidas (ONU, 2010) como un derecho humano fundamental. Desde entonces, numerosos marcos normativos han incorporado la obligación de los Estados y empresas de garantizar el acceso a agua limpia, segura y asequible, incluso en contextos extractivos (Boelens, 2015; Sultana, 2021).

En el ámbito ambiental, la sostenibilidad hídrica implica mantener el equilibrio entre la extracción, el consumo y la restauración del recurso, preservando su calidad química y ecológica. La generación de DAM, al alterar la composición iónica y el pH del agua, representa una vulneración directa de este derecho, pues compromete su potabilidad y su uso ecosistémico (Gudynas, 2018).

En Colombia, la Constitución Política de 1991 (art. 79) reconoce el derecho a gozar de un ambiente sano y establece la obligación de proteger los recursos naturales. La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (MADS, 2010) y la Ley 99 de 1993 desarrollan este mandato, imponiendo el principio de prevención y la responsabilidad ambiental empresarial. De igual modo, la jurisprudencia constitucional, como la Sentencia T-622 de 2016, que reconoce al río Atrato como sujeto de derechos, ha ampliado la interpretación de la sostenibilidad hacia una visión biocéntrica, en la que la naturaleza es considerada sujeto de protección jurídica.

Integrar el derecho humano al agua dentro del marco teórico de la minería sostenible significa reconocer que toda estrategia técnica de remediación debe garantizar simultáneamente la equidad ambiental y social. En consecuencia, la remediación del DAM mediante materiales calcoalcalinos no solo responde a una necesidad técnica, sino también a una exigencia ética y jurídica de restauración del ciclo hidrosocial (López & Pérez, 2022; Molina et al., 2024).

El enfoque de sostenibilidad que se propone en esta investigación articula estos principios en un modelo de gobernanza minera donde el agua deja de ser un insumo y pasa a concebirse como patrimonio ecológico y bien común, pilar esencial de la justicia ambiental y de la resiliencia territorial.

5.5. Articulación conceptual entre minería responsable, economía circular y justicia ambiental

La mitigación del drenaje ácido de mina (DAM) mediante el uso de roca estéril calcoalcalina trasciende su dimensión estrictamente geoquímica y debe comprenderse dentro de un marco conceptual integrado que articule minería responsable, economía circular y justicia ambiental. Esta integración permite situar la propuesta no solo como solución técnica, sino como estrategia estructural de sostenibilidad territorial.

Desde la perspectiva de la minería responsable, los principios del International Council on Mining and Metals (ICMM, 2025a; 2025b) establecen que la gestión ambiental debe incorporarse a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto minero, incluyendo cierre y post-cierre, bajo criterios de prevención del daño, reducción de riesgos y responsabilidad intergeneracional. En este sentido, la reutilización de estériles como medio reactivo contribuye a internalizar impactos ambientales y disminuir la dependencia de insumos externos, alineándose con estándares contemporáneos de desempeño ambiental.

La economía circular aplicada al sector extractivo implica cerrar ciclos materiales y energéticos dentro del propio sistema minero. La roca estéril, tradicionalmente considerada pasivo, se reinterpreta como recurso funcional con capacidad neutralizante. Estudios recientes que emplean evaluación de ciclo de vida en tecnologías de tratamiento de DAM evidencian que soluciones basadas en materiales secundarios pueden reducir impactos acumulativos y mejorar el desempeño ambiental comparativo frente a tratamientos activos convencionales (Mahmoudi Kouhi et al., 2024).

La justicia ambiental introduce una dimensión ética y distributiva en el análisis. El DAM constituye una externalidad persistente que puede afectar comunidades vulnerables décadas después del cierre. Por tanto, una estrategia que reduzca la probabilidad de generación y permanencia de pasivos contribuye a evitar la transferencia intergeneracional de cargas ambientales. Esta articulación refuerza el carácter sistémico del desarrollo sostenible, integrando eficiencia técnica con equidad social.

5.6. Síntesis integradora

El marco teórico articula de manera coherente los fundamentos de la teoría de sistemas, la geoquímica ambiental, la economía circular y los derechos ambientales, conformando una base conceptual robusta para la sostenibilidad minera. Desde esta perspectiva integradora, la minería subterránea puede transitar hacia sistemas regenerativos y resilientes, en los que los procesos de extracción, tratamiento y restauración se articulen bajo principios de eficiencia, equilibrio ecosistémico y responsabilidad intergeneracional. La interrelación entre economía circular, geoquímica y sistemas integrados sustenta la hipótesis central de esta investigación: es posible alcanzar la neutralización y el aprovechamiento sostenible del drenaje ácido de mina mediante un enfoque sistémico, circular y geoquímicamente controlado, capaz de optimizar los procesos naturales de neutralización, reducir la huella ambiental y promover una transición justa y ambientalmente responsable en la minería subterránea. Este paradigma contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, 12 y 15, al fortalecer la gestión del agua, la producción responsable y la conservación de los ecosistemas terrestres como pilares del desarrollo sostenible.

5.7. Tensiones conceptuales entre enfoques técnicos, normativos y éticos del desarrollo sostenible en minería

El desarrollo sostenible en el contexto minero ha sido abordado desde al menos tres marcos conceptuales diferenciados: el enfoque técnico-operativo, el enfoque normativo-regulatorio y el enfoque ético-político. Aunque convergen en la búsqueda de reducción de impactos ambientales y sociales, sus fundamentos epistemológicos y criterios de evaluación difieren sustancialmente (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987; Sachs, 2015).

Desde el enfoque técnico, la sostenibilidad se operacionaliza mediante indicadores medibles de desempeño ambiental, como pH, concentración de metales disueltos, eficiencia de remoción, estabilidad mineralógica y persistencia hidráulica, así como eficiencia energética y viabilidad económica. Este enfoque prioriza la optimización de procesos y la minimización de riesgos cuantificables. En el caso del tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM), la sostenibilidad técnica se asocia a la capacidad neutralizante efectiva, estabilidad de fases precipitadas secundarias, control de pasivación superficial y mitigación de colmatación en horizontes temporales prolongados (Nguegang & Ambushe, 2025; Ngerem et al., 2026).

El enfoque normativo, por su parte, se estructura alrededor de estándares regulatorios, límites máximos permisibles y marcos internacionales de gobernanza minera. Instrumentos como la guía “Integrated Mine Closure: Good Practice Guide” (ICMM, 2025a) o el estándar sectorial GRI 14 para minería (Global Reporting Initiative [GRI], 2024) definen obligaciones institucionales y criterios de reporte. Sin embargo, el cumplimiento normativo no necesariamente garantiza justicia distributiva ni sostenibilidad intergeneracional; puede limitarse al umbral mínimo de conformidad legal.

Finalmente, el enfoque ético del desarrollo sostenible introduce dimensiones de equidad, responsabilidad intergeneracional y justicia ambiental. El Informe Brundtland estableció el principio de no comprometer las capacidades de las generaciones futuras (WCED, 1987). Rawls (1999) propone principios de justicia que priorizan la protección de los menos aventajados, mientras que Sen (1999) sostiene que el desarrollo debe evaluarse por su contribución a las capacidades reales de las personas. En este marco, la persistencia del DAM tras el cierre minero representa una tensión ética significativa, particularmente cuando la exposición crónica a metales en agua potable constituye un riesgo documentado para la salud pública (World Health Organization [WHO], 2022).

La discrepancia central entre estos enfoques radica en su unidad de análisis: el enfoque técnico evalúa desempeño del sistema; el normativo evalúa cumplimiento; el ético evalúa distribución de riesgos y beneficios en el tiempo y el territorio. Una tecnología puede ser técnicamente eficiente y normativamente conforme, pero éticamente cuestionable si perpetúa inequidades territoriales.

En este contexto, la propuesta de reutilización de roca estéril calcoalcalina como medio de neutralización del DAM adquiere relevancia al articular los tres enfoques. Técnicamente,

demuestra eficiencia neutralizante; normativamente, puede alinearse con estándares de cierre integrado; éticamente, reduce la probabilidad de transferencia intergeneracional de pasivos ambientales (ICMM, 2025a; Nguengang & Ambushe, 2025). Esta convergencia permite superar la fragmentación conceptual y avanzar hacia una interpretación sistémica del desarrollo sostenible aplicado a la minería.

6. Metodología

6.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de enfoque cuantitativo y de carácter experimental aplicado, ya que se diseñaron y ejecutaron ensayos de laboratorio para evaluar el comportamiento de la roca estéril calcoalcalina en la neutralización del drenaje ácido de mina (DAM). En estos experimentos se manipularon deliberadamente variables de control, como la relación sólido/líquido, el tiempo de contacto, la granulometría y la concentración inicial de metales, con el fin de observar su efecto sobre el pH, la acidez y la remoción de elementos disueltos.

El estudio se clasifica como explicativo, porque busca establecer relaciones causa–efecto entre las propiedades físico-químicas y mineralógicas de la roca estéril y su desempeño como material neutralizante. También es una investigación aplicada, en la medida en que orienta sus resultados a la solución de un problema ambiental concreto en un contexto minero real. Complementariamente, incorpora un componente documental y analítico, al apoyarse en literatura científica y lineamientos técnicos que sustentan el diseño experimental y la interpretación de los resultados.

Ontológicamente se parte del supuesto de que la actividad minera opera sobre sistemas naturales abiertos y genera interacciones de largo plazo entre procesos físicos, institucionales y sociales. En consecuencia, el drenaje ácido de mina (DAM) se conceptualiza como un fenómeno socio-geoquímico complejo, cuya persistencia no puede analizarse únicamente desde la química ambiental, sino desde su inserción territorial y temporal.

Desde el punto de vista epistemológico, el estudio adopta una perspectiva orientada a la resolución de problemas concretos. La validez del conocimiento producido descansa en la reproducibilidad experimental (ensayos estáticos y cinéticos), la coherencia geoquímica del sistema evaluado y la posibilidad de escalamiento técnico. No obstante, la investigación reconoce que la suficiencia técnica no agota la discusión sobre sostenibilidad.

En el plano ético, el estudio dialoga con la noción de responsabilidad intergeneracional planteada por la Comisión Brundtland (WCED, 1987), así como con los enfoques de justicia distributiva (Rawls, 1999) y capacidades (Sen, 1999), en cuanto el acceso a agua segura constituye una condición básica para el ejercicio de libertades sustantivas.

6.2. Caracterización física, química y mineralógica de la roca estéril residual generada en la explotación minera subterránea, con énfasis en su composición calco-alcalina y contenido de carbonatos para comprobar su efectividad como material neutralizante

La caracterización de la roca estéril residual se llevó a cabo mediante una combinación de técnicas analíticas y descriptivas orientadas a determinar su composición calco-alcalina, el contenido de carbonatos y su potencial de uso como material neutralizante de drenajes ácidos de mina. Este proceso metodológico permitió obtener una visión integral del comportamiento geoquímico y mineralógico del material, considerando su origen y las condiciones propias de la explotación minera subterránea.

6.2.1. Muestreo y descripción macroscópica

El muestreo se realizó en frentes activos de explotación y zonas de acopio de estériles, garantizando la representatividad de las litologías predominantes. Adicionalmente, se examinaron testigos de perforación provenientes de campañas de exploración previas, con el fin de correlacionar la mineralogía de profundidad con la de superficie. Las muestras de mano fueron analizadas a nivel macroscópico empleando lupa de 10×, observando color, textura, grado de alteración, tipo de mineralización visible, tamaño de grano y presencia de venillas o rellenos secundarios. Como ensayo complementario, se aplicó ácido clorhídrico (HCl al 10%) sobre fragmentos frescos, para verificar cualitativamente la presencia de minerales carbonatados mediante la reacción de efervescencia. Este ensayo permitió estimar de forma rápida la abundancia relativa de carbonatos como calcita o dolomita en las muestras analizadas.

6.2.2. Caracterización física

Con el propósito de establecer las propiedades físicas del material, se determinaron la densidad aparente, la porosidad y la granulometría mediante tamizado mecánico. La roca fue triturada hasta tamaños de fracción controlada, a fin de correlacionar el tamaño de partícula con la velocidad de reacción frente a soluciones ácidas. Estos parámetros resultan esenciales para predecir la eficiencia del proceso de neutralización y la capacidad de disolución de los carbonatos presentes en la matriz rocosa.

6.2.3. Análisis químico

El análisis químico elemental se realizó mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), y en casos específicos, mediante ICP-MS para la

determinación de trazas metálicas. Estas técnicas permitieron cuantificar los principales óxidos (CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) y los elementos minoritarios que pudiesen influir en la reactividad o en la capacidad de neutralización del material. Los resultados fueron expresados en porcentaje en peso y normalizados al 100 %, de acuerdo con los protocolos analíticos estándar empleados en la caracterización geoquímica de materiales de mina. Se tomaron 10 muestras de análisis geoquímicos de la Empresa minera Damasa, patrocinadora de la investigación.

6.2.4 Análisis mineralógico

Para la identificación de las fases minerales, se efectuaron observaciones con lupa binocular y comparación con los testigos de perforación, apoyadas en información mineralógica previa obtenida mediante difracción de rayos X (DRX) en estudios del área. La determinación se enfocó en establecer la proporción de minerales carbonatados (calcita, dolomita, ankerita), silicatos secundarios y fases ferruginosas asociadas a procesos de alteración. Esta descripción permitió definir la composición mineralógica predominante y su relación con los posibles mecanismos de neutralización de acidez. Esta labor fue realizada en la faena diaria del autor de la investigación como geólogo de la Empresa minera Damasa.

6.3. Determinación del impacto del tratamiento con roca residual en las concentraciones de metales pesados de los drenajes ácidos de mina

6.3.1. Ensayo 1. Capacidad de neutralización

6.3.1.1. Capacidad de neutralización de la roca con diferentes granulometrías

Se determinó el poder de neutralización de las rocas, el cual indica la capacidad que tiene el material para neutralizar el ácido contenido en los drenados provenientes de las minas presentes en la zona, los cuales dependen de la capacidad de reacción de los compuestos alcalinos presentes en la roca, como carbonato de calcio de la calcita presente en la matriz rocosa. Para determinar el poder de neutralización, se tomó roca triturada y se tamizó para obtener diferentes tamaños de partícula, con el fin de determinar la granulometría más eficiente para neutralizar el ácido presente. Se obtuvieron cuatro tamaños: i) mayor a 2 mm; ii) entre 2 mm y 0,5 mm; iii) entre 0,5 mm y 0,25 mm y iv) menor a 0,25 mm (Figura 1).



Figura 1. Apariencia del material en las diferentes granulometrías preparadas para el montaje del ensayo.

A cada tamaño de roca se le calculó la capacidad de neutralizar el ácido clorhídrico. Para esto, se pesó 1 g de roca y se diluyó en 25 mL de HCl 1M, esta solución se calentó por 30 min a 80°C. Posterior a esto, se añadió 100 mL de agua destilada y se calentó de nuevo por 5 min a la misma temperatura. La muestra se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y se tituló con NaOH 1M y cinco gotas de fenolftaleína (Díaz & Sadeghian, 2022). Luego, se añadió 100 mL de agua destilada y se calentó de nuevo por 5 min a la misma temperatura. La muestra se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y se tituló con NaOH 1M y cinco gotas de fenolftaleína. La acidez titulable se expresó según los mL consumidos de NaOH durante la titulación (Díaz & Sadeghian, 2022). Cada muestra se procesó por duplicado.

6.3.1.2. Capacidad de neutralización de la roca por contacto directo

Posteriormente, se realizaron ensayos de neutralización por contacto directo para determinar el tiempo de retención necesario para neutralizar la totalidad del ácido contenido en el drenado. Para esto, se usó una solución de ácido sulfúrico al 0,02N (0,5 mL / 1000 mL de solución).

Se tomaron 5 testigos de roca de una longitud aproximada de 1 metro y un diámetro de 3,8 cm (1,5 pulgadas) y un peso promedio de 2.439 g, las cuales se introdujeron en tubería de PVC de 2" sellados. A cada muestra se añadió alrededor de 500 mL de solución ácida y se dejó en contacto durante una semana (Figura 2). Diariamente, se midió el pH y la acidez titulable, con el fin de determinar el momento en el que se neutralizó en su totalidad el ácido contenido, sacando 10 mL de solución de cada muestra, se midió el pH por medio de medidor de pH Hach multiparámetro HQ40 y se midió la acidez titulable agregando 5 gotas de fenolftaleína y titulando con NaOH al 0,25M.



Figura 2. Montaje establecido para la evaluación de la capacidad de neutralización de la roca.

6.3.1.3. Capacidad de neutralización de la roca por lagunas de reacción

Se diseñaron lagunas de reacción a escala piloto en recipientes plásticos (20×15×10 cm), en las cuales se desarrollaron dos tratamientos con material a diferente tamaño de partícula. En el primer tratamiento, se usaron 1.000 g de roca con tamaño de grano mayor a 2 mm de diámetro y un segundo tratamiento donde se usó 500 g de roca con tamaño de grano menor a 2mm y 500 g con roca a tamaño de grano mayor a 2mm (Tabla 2). En cada tratamiento se usaron 250 mL de una solución que contenía: ácido sulfúrico a una concentración de 0,02N, zinc (200 ppm), arsénico (12 ppm), sulfato de cobre (40 ppm) y cadmio (7,8 ppm); condiciones similares a las reportadas en la literatura para drenados ácidos de mina, reportados en diferentes partes del país. De cada tratamiento se hicieron tres repeticiones. Paralelamente, se realizó un ensayo en el cual cada tratamiento se combinó con 6 esquejes de pasto vetiver para determinar, la tendencia en la respuesta de esta asociación en la neutralización de la roca.

Tabla 2. Descripción de tratamientos evaluados en la capacidad de neutralización de la roca por lagunas de reacción.

Tratamiento	Muestra	Descripción
1	1	100% roca gruesa (mayor a 2 mm)

	2	100% roca gruesa (mayor a 2 mm)
	3	100% roca gruesa (mayor a 2 mm)
2	5	50% roca gruesa (mayor a 2 mm) + 50% roca fina (meno a 2 mm)
	6	50% roca gruesa (mayor a 2 mm) + 50% roca fina (meno a 2 mm)
	7	50% roca gruesa (mayor a 2 mm) + 50% roca fina (meno a 2 mm)
3	4	100% roca gruesa (mayor a 2 mm) + vetiver
4	8	50% roca gruesa (mayor a 2 mm) + 50% roca fina (meno a 2 mm) + vetiver

Se midió diariamente el pH y la acidez titulable, con el fin de determinar el momento en el que se neutralizó en su totalidad el ácido contenido. Para esto se tomaron 10 mL de solución de cada muestra, se midió el pH por medio de medidor de pH Hach multiparámetro HQ40 y se midió la acidez titulable agregando 5 gotas de fenolftaleína y titulando con NaOH al 0,25M.

6.3.2. Ensayo 2. Remoción metales pesados de los drenajes ácidos de mina

Para la determinación del impacto del tratamiento con roca residual en la eliminación de metales pesados de los drenados ácidos de mina, se emplearon recipientes plásticos (20×15×10 cm) con un volumen total de 1.285 mL simulando humedales de flujo subsuperficial, usando como medio filtrante la roca residual. Se evaluaron dos tratamientos utilizando diferentes tamaños de partícula. Uno con roca residual triturada a un tamaño de partícula entre 1 a 2 cm y el otro tratamiento con roca triturada con una granulometría menor a 0,5 cm. Se utilizaron tres réplicas por tratamiento. Adicionalmente, se realizó una observación con una réplica de cada una de las granulometrías sembradas con pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), por ser una especie muy usada para la eliminación de metales pesados (Figura 3). De otro lado, se realizó una observación utilizando los testigos de roca a manera de control (Tabla 3).



Figura 3. Montaje establecido para la determinación de la depuración de metales pesados.

Tabla 3. Descripción de tratamientos evaluados en la remoción de metales pesados de los drenajes ácidos de mina.

Tratamiento	Muestra	Descripción
1	1	Tamaño partícula entre 1 y 2 cm
	2	Tamaño partícula entre 1 y 2 cm
	3	Tamaño partícula entre 1 y 2 cm
2	5	Tamaño partícula menor a 0,5 cm
	6	Tamaño partícula menor a 0,5 cm
	7	Tamaño partícula menor a 0,5 cm
3	4	Tamaño partícula entre 1 y 2 cm + vetiver
4	8	Tamaño partícula menor a 0,5 cm + vetiver
5	9	Roca residual sin triturar (control)
	10	Roca residual sin triturar (control)
	11	Roca residual sin triturar (control)
	12	Roca residual sin triturar (control)

Para cada uno de los tratamientos que involucraron roca residual con diferente granulometría, se utilizó 1kg de esta como material filtrante, y se adicionaron 250 mL de drenados ácidos de mina, conteniendo una solución con ácido sulfúrico con una concentración de 0,02N aproximadamente, zinc (350 ppm), arsénico (12 ppm), cobre (40 ppm) y cadmio (8 ppm), con condiciones similares a las reportadas en la literatura (Salazar, 2018; Mancera & Álvarez, 2005) para drenados ácidos de mina de minerías de diferentes partes del país.

En el caso de la roca sin triturar, se utilizaron 4 réplicas de testigos de roca (tratamiento 5) con una longitud aproximada de 1 metro y un diámetro de 3,8 cm (1,5 pulgadas) y un peso

promedio de 2,5 kg, las cuales se introdujeron en tubería de PVC de 2" sellados y a los cuales se les adicionó alrededor de 500 mL de la solución ácida con los metales.

En todos los tratamientos, se dejó en contacto la roca residual con la solución ácida conteniendo los metales durante una semana. Diariamente, se midió el pH y la acidez titulable (expresada en mL consumidos de NaOH), con el fin de determinar el momento en el que se neutralizó en su totalidad el ácido contenido; para lo cual se muestrearon 10 mL de solución de cada muestra, se midió el pH por medio de medidor de pH Hach multiparámetro HQ40 y se midió la acidez titulable agregando 5 gotas de fenolftaleína y titulando con NaOH al 0,25M. A la semana, se tomaron las muestras finales y se enviaron a análisis al laboratorio Analtec (Pereira-Risaralda) para el análisis de contenido de metales. Dado que, el laboratorio requería de muestras mínimas de 750 mL para realizar el análisis, fue necesario completar el volumen de drenados obtenido, utilizando agua desionizada. Los contenidos de Arsénico y Cadmio se midieron con el método EPA 200.7:2001 (US EPA, 2001) y los contenidos de Cobre y Zinc total se midieron con los métodos SM 3030 K para la preparación de las muestras y SM 3111 B el análisis de la muestra.

6.4. Valoración de la viabilidad técnica y económica de la neutralización y remoción de metales pesados de drenajes ácidos de mina con roca residual

La valoración de la viabilidad técnica y económica de la neutralización y remoción de metales pesados provenientes de drenajes ácidos de mina (DAM) con roca residual carbonatada se desarrolló mediante una evaluación multicriterio comparativa, sustentada en evidencias experimentales, fundamentos geoquímicos y criterios de sostenibilidad bajo el enfoque de economía circular minera (Lazo, 2020). La metodología se estructuró en tres componentes principales:

6.4.1. Análisis comparativo técnico–económico (multicriterio)

Se diseñó una matriz comparativa entre dos sistemas de tratamiento: un sistema pasivo, basado en materiales carbonatados estériles de origen local, y un sistema activo con tratamientos convencionales de cal o hidróxido de sodio (NaOH). Los criterios de comparación se establecieron con base en resultados experimentales incluidos en investigaciones científicas recientes, valorados en una escala de 0 a 10 según desempeño relativo en eficiencia, estabilidad del pH, durabilidad,

costo operativo (OPEX), sostenibilidad, generación de residuos, riesgo operativo e infraestructura. Los valores obtenidos se consolidaron en una matriz multicriterio y se representaron gráficamente mediante un radar de desempeño técnico–económico, con el fin de visualizar la competitividad entre ambos sistemas bajo parámetros de sostenibilidad y economía circular.

6.4.2. Sustento geoquímico del sistema

El comportamiento del sistema de neutralización fue analizado mediante el modelo tampón carbonato–bicarbonato, que describe la interacción entre las especies CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} en equilibrio dentro del rango de pH 6,0–8,0. En esta etapa se estudió el papel del bicarbonato (HCO_3^-) como agente regulador principal, el cual amortigua variaciones de acidez y permite mantener condiciones químicamente estables durante el proceso de neutralización. La reacción de los carbonatos de calcio y magnesio presentes en la roca estéril fue evaluada bajo condiciones controladas, demostrando su capacidad para sostener un equilibrio químico prolongado en el tiempo.

6.4.3. Integración de criterios científicos y económicos

Para la interpretación técnica y económica se emplearon datos provenientes de literatura científica reciente, los cuales respaldan el desempeño de los materiales carbonatados frente a los tratamientos activos. Se incorporaron los siguientes criterios de análisis:

- Eficiencia de neutralización. Capacidad de remoción de acidez y estabilización del pH con partículas de 0,5–1,0 mm, alcanzando remociones superiores al 95% (An et al., 2023).
- Durabilidad. Estabilidad del pH del efluente durante más de un año bajo condiciones piloto (Naghoun et al., 2025).
- Costo económico. Disminución del OPEX mediante el uso de materiales locales de bajo costo y menor generación de lodos (Pocaa et al., 2025).
- Sostenibilidad ambiental. Reducción de huella de carbono y aprovechamiento de residuos industriales carbonatados (Mahmoudi Kouhi et al., 2024).
- Riesgo e infraestructura. Bajo riesgo químico y mínima complejidad operativa, frente a la dosificación y manipulación de reactivos cáusticos en tratamientos activos.

Estos criterios se valoraron de forma integrada en la matriz multicriterio, determinando la viabilidad técnica y económica del sistema pasivo con roca estéril carbonatada como alternativa efectiva y sostenible frente a los métodos convencionales de tratamiento de DAM.

6.5.Limitaciones metodológicas

En el desarrollo experimental se incluyeron tratamientos comparativos y otros de carácter exploratorio, orientados a identificar el comportamiento geoquímico de la roca estéril calcoalcalina como material neutralizante. En algunos tratamientos exploratorios no se realizaron repeticiones completas, lo cual constituye una limitación metodológica del estudio.

No obstante, esta condición no invalida los resultados obtenidos, ya que estos permiten identificar tendencias consistentes de neutralización y remoción de metales, y se encuentran alineados con la literatura reciente que reconoce que muchas propuestas de tratamiento de drenajes ácidos transitan por fases de laboratorio y prefactibilidad antes de su escalamiento a nivel piloto o de campo (Masindi et al., 2022).

7. Resultados y discusión

7.1. Caracterización física, química y mineralógica de la roca estéril residual generada en la explotación minera subterránea, con énfasis en su composición calco-alcalina y contenido de carbonatos para comprobar su efectividad como material neutralizante

Los resultados de las observaciones macroscópicas, los ensayos con HCl y los análisis químicos obtenidos por ICP (Tabla 3), se integraron con el fin de confirmar la naturaleza calco-alcalina de la roca estéril residual proveniente de la explotación subterránea. En los testigos de perforación y en las muestras de mano se identificaron minerales característicos de litologías intermedias a básicas, tales como plagioclasas cálcicas, clinopiroxeno, anfíboles y calcita, coherentes con asociaciones mineralógicas propias de rocas calcoalcalinas (Deer, Howie & Zussman, 2013; Klein & Dutrow, 2012).

Los ensayos cualitativos con HCl al 10% mostraron reacciones efervescentes moderadas a fuertes, lo que confirmó la presencia de carbonatos, de acuerdo con las metodologías de reconocimiento geoquímico ampliamente utilizadas en campo (APHA, 2017). Estos resultados fueron coherentes con los valores analíticos obtenidos por ICP-OES, donde el contenido de Ca total osciló entre 2,29 % y 8,48 %, con un promedio de 3,96 % Ca. Este valor fue superior a la mediana del Ca en la corteza continental colombiana (0,98 % Ca), reportada por el Atlas Geoquímico de Colombia (Servicio Geológico Colombiano, 2020), lo cual indica un enriquecimiento relativo atribuible a plagioclasas cálcicas y a fases carbonatadas intersticiales.

Desde la perspectiva geoquímica, la concentración de Ca confirma que la roca estéril posee capacidad alcalinizante, ya que el calcio es un catión clave en los procesos de disolución congruente que elevan el pH y favorecen la precipitación de hidróxidos y carbonatos metálicos durante el tratamiento del drenaje ácido de mina (Blowes et al., 2014; Skousen, 2017). La coexistencia de silicatos cálcicos y carbonatos implica una neutralización en dos fases: una rápida, controlada por la disolución de calcita, y otra lenta y sostenida, dominada por el intemperismo de plagioclasas y silicatos de Ca-Mg, mecanismo ampliamente documentado en estudios de tratamiento pasivo (Younger, Banwart & Hedin, 2002; García-Valero et al., 2020).

En conjunto, la evidencia de campo, la reactividad frente a HCl y los resultados de ICP (Tabla 3) respaldan la clasificación de la roca estéril residual como una litología calco-alcalina con contenido suficiente de carbonatos para ser empleada como material neutralizante en sistemas de

tratamiento pasivo de DAM, en concordancia con los criterios técnicos propuestos por Turingan et al. (2020) y Retka et al. (2020).

Tabla 4. Contenido de Calcio en la roca estéril residual, determinación por Plasma Acoplado Inductivamente

Muestra	Tipo	Ensayo	Consecutivo	% Calcio (Ca)
1	Muestra de mano	GQ1800376	GEO3487	2,97
2	Muestra de mano		GEO3489	2,74
3	Muestra de mano		GEO3452	2,29
4	Muestra de mano		GEO3528	8,48
5	Muestra de mano		GEO3558	3,33
6	Muestra de mano	GQ1800162	GEO3882	2,58
7	Muestra de mano		GEO3883	4,20
8	Muestra de mano	GQ1800629	GEO3634	5,92
9	Muestra de mano	GQ1800291	GEO1166	4,67
10	Muestra de mano		GEO1167	2,41
Promedio				3,96

En adición el hospedante litológico del yacimiento analizado se interpreta, en términos regionales, como producto de magmatismo de arco en margen convergente, vinculado a la subducción de la placa oceánica bajo el continente sudamericano (Stern, 2004; Zheng, 2019). En estos contextos, el ingreso de fluidos y componentes móviles desde la losa subducida hacia la cuña del manto genera fundidos hidratados y moderadamente oxidados ($\Delta FMQ \approx +1$ a $+2$), característicos de magmas calco-alcalinos que evolucionan hacia composiciones intermedias a félsicas (Pearce & Peate, 1995; Richards, 2022).

La diferenciación, la mezcla de magmas y el desgasificado tardío (pérdida del componente volátil del magma al acercarse a superficie) rico en $H_2O-Cl-S$ controlan la transferencia de metales y la sobresaturación de sulfuros en etapas someras, favoreciendo la formación de sistemas porfídicos $Cu(\pm Mo \pm Au)$ y en niveles superiores, asociaciones epitermales y skarn (Sillitoe, 2010; Hammarstrom et al., 2022). Este marco tectónico-magmático explica por qué la mayor parte de los yacimientos metalíferos de gran escala a lo largo de la margen occidental de América (en los Andes septentrionales, centrales y australes) están hospedados en secuencias ígneas calco-alcalinas de arco, con claras evidencias de oxidación y enriquecimiento en volátiles (Richards, 2022; Sillitoe, 2010).

En el caso colombiano y en el flanco norte andino, el magmatismo de arco asociado a la subducción de la placa de Nazca en la placa Suramericana ha producido suites dioríticas–

granodioríticas y vulcanitas afines, cuyas alteraciones hidrotermales expresan las zonaciones potásicas–fílica–propilítica–argílica típicas de un sistema porfídico–epitermal (Stern, 2004; Hammarstrom et al., 2022). Desde el punto de vista geoquímico, los rasgos discriminantes de magmas de arco son coherentes con un aporte de fluidos procedentes de los sedimentos y EEO (elementos enriquecidos en la losa) y con procesos de fusión por deshidratación de la cuña mantélica (Zheng, 2019; Pearce & Peate, 1995).

Esta combinación de hidratación, oxidación y espesamiento cortical en arcos maduros favorece concentraciones de Cu–Au a escala de distrito (Richards, 2022). En el contexto del presente estudio, la confirmación de litologías calcoalcalinas en la roca estéril/hospedante (mediante análisis DRX, ICP y ensayos de efervescencia con HCl para carbonatos) refuerza la interpretación de un origen tectono-magmático de arco para el hospedaje y la coherencia metalogenética regional. Además, la presencia de carbonatos en parte del material residual apoya su aprovechamiento como neutralizante en estrategias pasivas de mitigación de drenaje ácido de mina (DAM), bajo un enfoque de economía circular y sostenibilidad geoquímica.

Desde la perspectiva geoquímica, los rasgos observados, particularmente la presencia de carbonatos, óxidos y minerales secundarios asociados a alteraciones potásicas y propilíticas, confirman que la roca residual conserva capacidades neutralizantes relevantes para la mitigación de drenajes ácidos de mina (DAM). Este hallazgo es de gran importancia, ya que vincula la génesis geológica del material con su potencial funcional en procesos de sostenibilidad minera. En efecto, la coexistencia de minerales carbonatados con fases silicificadas moderadamente alteradas sugiere que el estéril podría actuar como un buffer geoquímico, favoreciendo la neutralización de acidez mediante reacciones de disolución–precipitación de carbonatos y la adsorción de iones metálicos. El carácter calco-alcalino y la presencia de carbonatos son, por tanto, indicadores de una geoquímica de equilibrio oxidante e hidratada, típica de magmas de arco. Este entorno origina minerales con mayor estabilidad frente a la meteorización ácida, lo que se traduce en un menor potencial generador de acidez y, simultáneamente, en una mayor capacidad neutralizante. Estas propiedades confieren a la roca residual un papel estratégico dentro de esquemas de reutilización circular de materiales mineros, en los cuales el residuo adquiere una segunda función como insumo de control ambiental, reduciendo la necesidad de reactivos externos y minimizando el OPEX operativo.

En términos de sostenibilidad, los resultados respaldan la viabilidad de integrar residuos calco-alcalinos en sistemas pasivos de tratamiento de DAM, aprovechando su disponibilidad local y bajo requerimiento de procesamiento. Esto implica un avance significativo frente a tratamientos activos convencionales basados en cal o soda cáustica, los cuales presentan altos costos asociados al consumo de reactivos y generación de lodos. La estrategia de reutilización del estéril residual se alinea, además, con los principios de la economía circular minera, en la medida en que cierra ciclos materiales, reduce el volumen de disposición final y convierte un pasivo ambiental en un activo funcional.

Finalmente, la coherencia entre los datos mineralógicos y la interpretación tectónica refuerza la idea de que las litologías hospedantes de yacimientos metalíferos en Colombia, especialmente en regiones como Caldas y Antioquia, no solo representan unidades de interés económico, sino también un recurso geo-ambiental con valor añadido en la gestión sostenible del territorio minero. De esta forma, la caracterización de la roca estéril trasciende su propósito descriptivo para consolidarse como una herramienta de planificación integral, orientada a la mitigación ambiental y al fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas extractivos en el marco del desarrollo sostenible.

7.2.Determinación del impacto del tratamiento con roca residual en las concentraciones de metales pesados de los drenajes ácidos de mina

7.2.1. Ensayo 1. Capacidad de neutralización

7.2.1.1.Capacidad de neutralización de la roca con diferentes granulometrías

Se observó que las muestras con menor tamaño de partícula tuvieron mejores rendimientos en la neutralización del ácido contenido. Se observó que los tamaños de partícula menores, correspondientes a las muestras con tamaños entre (iii) 0,5 y 0,25 mm y las muestras con tamaños (iv) menores a 0,25 mm, disminuyeron hasta en un 20% la acidez de las muestras, en contraste con las muestras de tamaño de partícula mayor (mayor a 2 mm y entre 2 y 0,5 mm), donde se redujo la acidez de la muestra en un 10%.

7.2.1.2.Capacidad de neutralización de la roca por contacto directo

Se apreció que, en los ensayos con testigos de roca, se requiere un tiempo de retención de al menos 6 días para neutralizar por completo el ácido contenido en las muestras. Se reconoce que no todas las muestras neutralizan con la misma eficiencia el ácido contenido, este comportamiento se puede dar a causa del contenido de compuesto alcalino presente en la matriz rocosa, como el contenido de matriz de calcita, pues a mayor contenido de carbonato de calcio, proveniente de esta roca, tendrá una mejor eficiencia en la neutralización.

7.2.1.3. Capacidad de neutralización de la roca por lagunas de reacción

Por último, se observó que las lagunas que contenían material rocoso mixto (mitad material grueso y mitad material fino) (tratamiento 3), obtuvieron un mayor rendimiento en la neutralización del ácido de la solución con respecto a las lagunas con material rocoso grueso (tratamiento 1).

Los resultados de la Tabla 5 muestran que todas las lagunas de reacción partieron de un pH fuertemente ácido ($\text{pH} \approx 2,0$). Se observó en las muestras con material mixto (tratamiento 3), que a partir del segundo día el pH de las muestras en promedio fue de 7,02; en contraste con las muestras con material grueso (tratamiento 1), las cuales tuvieron valores promedio de 6,4. Solo hasta el día 7, las muestras con material grueso lograron obtener un drenado con valores promedio de pH de 7,00 (Tabla 5 y Figura 4). Las muestras del tratamiento 2 presentan los pH finales más altos (entre 7,71 y 7,99) (Tabla 5 y Figura 4), lo que sugiere una mayor disponibilidad de fases carbonatadas activas o un contacto más eficiente entre la solución ácida y la matriz rocosa (Nordstrom & Alpers, 2020).

Tabla 5. Comportamiento del pH en las lagunas de reacción, en los tratamientos evaluados.

Tto.	Muestra	Día 0	DE	Día 1	DE	Día 2	DE	Día 3	DE	Día 4	DE	Día 5	DE	Día 6	DE	Día 7	DE
1	1	2,00	0,00	6,36	0,12	6,59	0,19	6,64	0,18	6,69	0,15	6,72	0,10	6,75	0,06	7,02	0,07
	2	2,00		6,57		6,31		6,36		6,45		6,56		6,66		6,88	
	3	2,00		6,38		6,68		6,70		6,72		6,74		6,77		6,99	
2	5	2,00	0,00	7,30	0,29	6,90	0,10	7,06	0,10	7,18	0,17	7,26	0,26	7,37	0,27	7,71	0,14
	6	2,00		6,79		6,81		7,10		7,26		7,36		7,59		7,87	
	7	2,00		7,30		7,01		7,25		7,50		7,75		7,90		7,99	
3	4	2,00	NA	6,37	NA	6,41	NA	6,49	NA	6,56	NA	6,64	NA	6,72	NA	7,08	NA
4	8	2,00	NA	6,94	NA	7,36	NA	*	NA	*	NA	*	NA	*	NA	*	NA

NA: No Aplica. *No se registraron lecturas.

Tto. Tratamiento

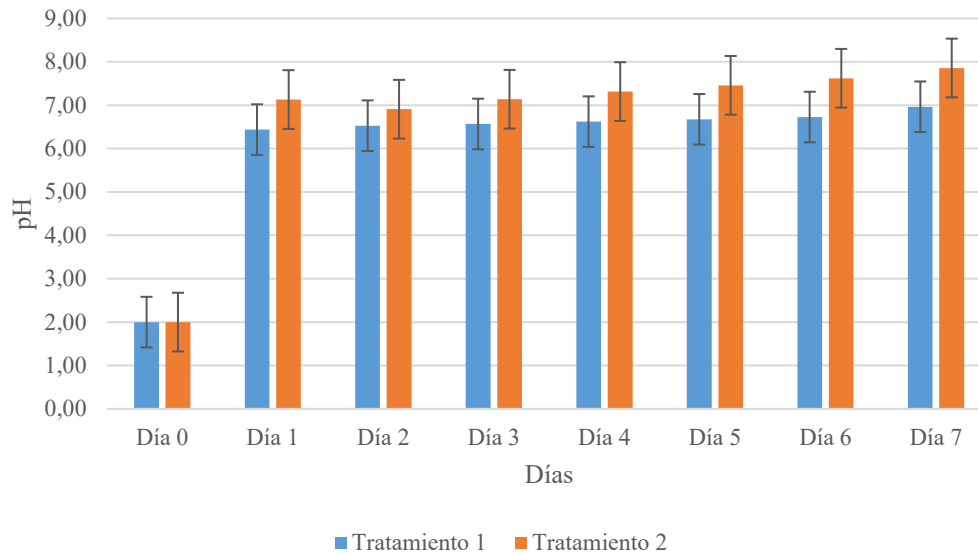


Figura 4. Evolución del pH en las lagunas de reacción de los tratamientos 1 y 2, para determinar la capacidad de neutralización de la roca estéril. Valores de pH obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.

En el tratamiento 2 relacionado con el material rocoso mixto, se redujo la acidez titulable (expresada en mL gastados de NaOH) en un 95,5% en promedio y en el tratamiento 1, correspondiente al material grueso, se redujo la acidez en un 80% en el mismo periodo de tiempo; en este tratamiento solo hasta el día 6, se logró reducir la acidez de la solución hasta un 90%. Se observó que las muestras de roca lograron neutralizar el ácido contenido en una solución acuosa con ácido sulfúrico (Tabla 6 y Figura 5). En promedio, se requiere un periodo de retención de al menos 7 días para lograr una neutralización completa. Si los tamaños de partícula son menores, la neutralización puede hacerse en un menor tiempo. En la Tabla 6, se presenta la evolución de la acidez titulable en las lagunas de reacción de los tratamientos a lo largo del periodo de tiempo del ensayo.

Tabla 6. Evolución de la acidez titulable (expresada en mL gastados de NaOH) en las lagunas de reacción. Ensayo 1.

Tto.	Muestra	Día 0	DE	Día 1	DE	Día 2	DE	Día 3	DE	Día 4	DE	Día 5	DE	Día 6	DE	Día 7	DE
1	1	1,00	0,00	0,33	0,03	0,24	0,08	0,20	0,08	0,18	0,06	0,14	0,06	*	0,08	0,05	0,06
	2	1,00		0,28		0,38		0,34		0,28		0,24		0,22		0,17	
	3	1,00		0,30		0,26		0,22		0,18		0,14		0,11		0,10	
2	5	1,00	0,00	0,06	0,04	0,29	0,04	0,20	0,02	0,12	0,02	0,09	0,02	0,06	0,02	0,04	0,01
	6	1,00		0,13		0,30		0,22		0,15		0,07		0,05		0,04	
	7	1,00		0,06		0,22		0,18		0,12		0,06		0,02		0,02	
3	4	1,00	NA	0,31	NA	0,18	NA	0,16	NA	0,14	NA	0,12	NA	0,10	NA	0,07	NA
4	8	1,00	NA	0,13	NA	0,09	NA	*	NA	*	NA	*	NA	*	NA	*	NA

NA: No Aplica. *No se registraron lecturas.

Tto. Tratamiento.

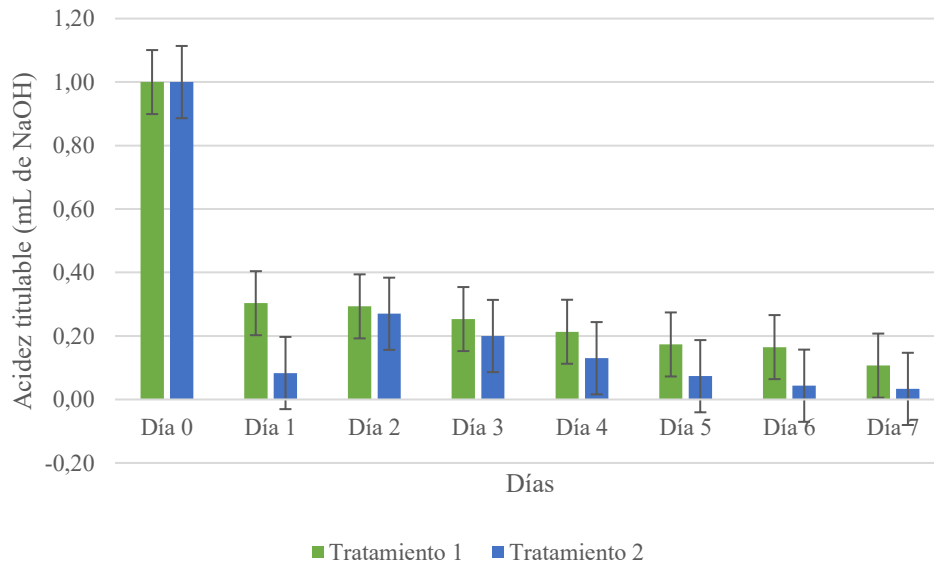


Figura 5. Evolución de la acidez titulable (expresada en mL de NaOH) en las lagunas de reacción de los tratamientos 1 y 2, para determinar la capacidad de neutralización de la roca estéril. Valores de pH obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.

Desde la perspectiva del segundo objetivo específico, estos resultados son consistentes con la hipótesis de que la roca residual calcoalcalina no solo es capaz de elevar el pH de los drenajes ácidos de mina, sino también de reducir de manera significativa la acidez asociada, creando condiciones adecuadas para la precipitación y/o coprecipitación de metales pesados. La rápida neutralización observada en varias lagunas indica que, bajo las condiciones de laboratorio evaluadas, sería posible configurar sistemas pasivos de tratamiento con tiempos de retención relativamente cortos (Cravotta, 2008). No obstante, las diferencias entre muestras (particularmente en el comportamiento de las muestras 2 y 4 frente al resto) sugieren que la eficiencia puede verse influenciada por factores como la granulometría, la homogeneidad del lecho de roca y la distribución real de flujo dentro de las lagunas, aspectos que deben considerarse en el diseño a escala piloto o de campo. En la Tabla 7 se presenta un resumen de los resultados.

Tabla 7. Resumen de parámetros de neutralización de la roca por lagunas de reacción.

Tratamiento	Muestra	pH inicial	pH final	Promedio pH final	Días pH > 6,5	Promedio días pH > 6,5	Reducción de acidez (%)	Promedio reducción de acidez (%)
1	1	2,00	7,02	6,96	2	1,67	95,0	89,33
	2	2,00	6,88		1		83,0	
	3	2,00	6,99		2		90,0	
2	5	2,00	7,71	7,86	1	1	96,0	96,67
	6	2,00	7,87		1		96,0	
	7	2,00	7,99		1		98,0	
3	4	2,00	7,08	7,08	4	4	93,0	93,00
4	8	2,00	7,36	7,36	2	2	99,9	99,90

Los resultados, permiten evidenciar que el tratamiento con roca residual calcoalcalina tiene un impacto positivo sobre la calidad química de los drenajes ácidos, al transformar un medio fuertemente ácido en un ambiente cercano a la neutralidad, con acidez residual muy baja. Estos resultados sientan las bases para el análisis posterior de las concentraciones de metales pesados, en la medida en que un pH más alto y una acidez reducida favorecen los procesos de remoción de metales evaluados en los ensayos de concentración descritos en secciones siguientes.

Todas las lagunas partieron de un pH inicial homogéneo (pH 2,0), propio de un drenaje ácido de mina fuertemente ácido (Nordstrom & Alpers, 1999). El pH final promedio de 7,36, con una mediana de 7,22 y un rango entre 6,88 y 7,99, confirma que el sistema de tratamiento con roca residual calcoalcalina logró transformar un medio ácido en un entorno cercano a la neutralidad en todos los casos. Este comportamiento es coherente con lo reportado para sistemas de tratamiento pasivo basados en materiales carbonatados, en los que el pH se eleva típicamente a valores entre 6,0 y 8,0 cuando se dispone de suficiente capacidad neutralizante y tiempo de contacto (Johnson & Hallberg, 2005; Skousen, 2017).

En cuanto al tiempo requerido para alcanzar $\text{pH} \geq 6,5$, el promedio fue de 1,63 días, con un promedio de 1 día y un máximo de 4 días. Esto indica que, en la mayoría de las lagunas, la neutralización efectiva se logró durante las primeras 24 horas de interacción roca-solución, mientras que solo uno de los tratamientos requirió un tiempo notablemente mayor. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones ensayadas, sería factible diseñar sistemas pasivos de tratamiento con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, lo cual coincide con lo descrito en la literatura para humedales construidos y drenes anóxicos de piedra caliza eficientemente dimensionados (Skousen, 2017).

La reducción de acidez titulable presentó un comportamiento igualmente favorable. El promedio de reducción fue de 92,75 %, con una mediana de 94 % y un rango entre 83 % y 98 %. Incluso el valor mínimo (83,0%) implica una disminución sustancial de la carga ácida del drenaje tratado. Esta disminución de la acidez es un requisito fundamental para la remoción posterior de metales pesados, ya que la precipitación de hidróxidos, carbonatos y otros compuestos metálicos se ve fuertemente favorecida por pH neutros y acidez baja (Nordstrom & Alpers, 1999; Johnson & Hallberg, 2005).

Si se contrastan estos resultados con las guías de calidad de agua propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se observa que el pH final de las lagunas se ubica dentro del intervalo recomendado para agua potable (pH 6,5–8,5) (WHO, 2017), aunque cabe precisar que el objetivo de este sistema no es producir agua potable sino mitigar los impactos de los drenajes ácidos en cuerpos de agua receptores. No obstante, alcanzar condiciones de pH cercanas a las de un sistema natural neutro constituye un avance significativo en términos de reducción del riesgo ambiental y mejora de las condiciones para la vida acuática.

7.2.2. Ensayo 2. Remoción metales pesados de los drenajes ácidos de mina

En los ensayos para la determinación de la remoción de metales pesados en los drenajes ácidos de mina, se apreció para el Cobre (Cu) los valores más altos de remoción en la roca residual sin triturar (tratamiento 5), con promedios superiores a 95% (Tabla 8, 9 y Figura 6); esto puede atribuirse a una mayor presencia de fases carbonatadas intactas que favorecen la precipitación de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y su adsorción sobre superficies carbonatadas, coherente con lo señalado por Johnson & Hallberg (2005) y Skousen (2017). La eficiencia ligeramente superior de la roca sin triturar puede relacionarse con patrones de flujo más estables y con menor obstrucción por fracciones de roca finas, lo cual concuerda con hallazgos de Rose (2017) en estudios de sistemas pasivos donde el “armoring” puede afectar la retención de Cu cuando hay exceso de partículas finas.

Tabla 8. Porcentaje de remoción de metales pesados en los drenajes ácidos de mina.

Metal	Tto. 1			Tto. 3	Tto. 2			Tto. 4	Tto. 5			
	M1	M2	M3	L4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Cu	94,93	91,56	85,81	69,37	64,29	82,94	65,20	86,94	94,15	96,49	92,34	97,34
Zn	87,59	67,64	80,73	76,63	55,24	80,08	36,14	82,05	23,76	32,61	31,08	33,90
As	90,89	90,89	90,89	90,89	90,89	90,89	42,32	-17,01	90,89	90,89	90,89	90,89
Cd	85,86	75,32	83,43	83,07	65,04	85,28	59,98	85,47	29,71	28,97	24,54	67,99

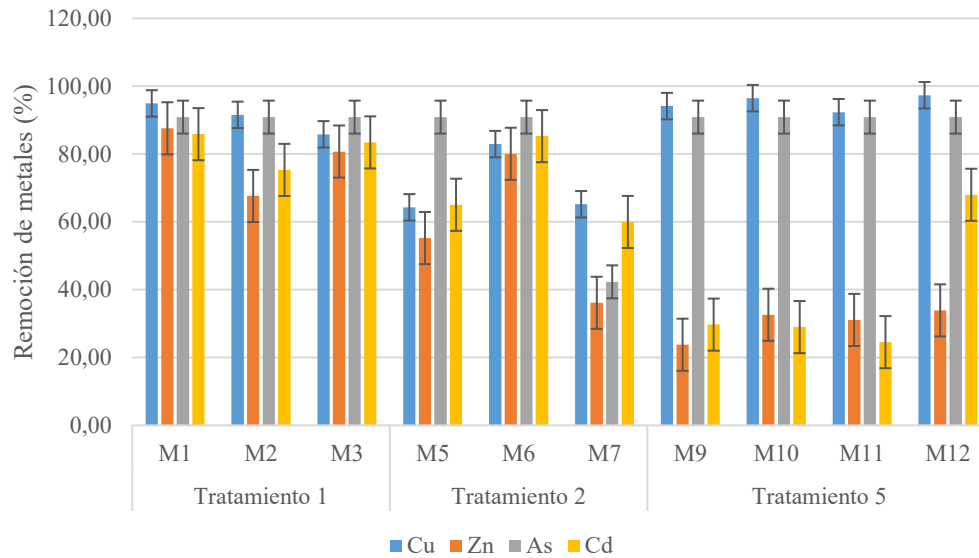


Figura 6. Porcentaje de remoción de metales según tamaño de partícula. Valores obtenidos del promedio de tres réplicas. La desviación estándar de las tres réplicas se presenta con barras de error.

Tabla 9. Estadísticas descriptivas de remoción de metales en porcentaje por tratamiento.

Tratamiento	Metal	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	DE
1	Cu	90,76	91,56	85,81	94,34	4,61
	Zn	78,66	80,73	67,64	87,59	10,14
	As	90,89	90,89	90,89	90,89	0,00
	Cd	81,54	83,43	75,32	85,86	5,52
2	Cu	70,81	65,20	64,29	82,94	10,51
	Zn	57,15	55,24	36,14	80,08	22,03
	As	74,70	90,89	42,32	90,89	28,04
	Cd	70,10	65,04	59,98	85,28	13,39
5	Cu	95,08	95,32	92,34	97,34	2,27
	Zn	74,70	31,85	23,76	33,90	4,53
	As	90,89	90,89	90,89	90,89	0,00
	Cd	37,80	29,34	24,54	67,99	20,25

El cobre mostró las mayores eficiencias de remoción dentro del conjunto de metales evaluados, lo cual puede explicarse por su comportamiento geoquímico bajo condiciones de pH moderadamente alcalinas. A pH superiores a 6,0–6,5, el Cu^{2+} presenta una marcada tendencia a precipitar como hidróxidos y carbonatos básicos, reduciendo significativamente su movilidad (Stumm & Morgan, 2012).

Investigaciones recientes han documentado la formación de fases secundarias como malaquita y azurita en sistemas pasivos basados en materiales calcoalcalinos, especialmente

cuando existe una disponibilidad adecuada de carbonato y tiempos de contacto suficientes (Chang et al., 2023). La consistencia de los resultados obtenidos en este estudio con la literatura refuerza la interpretación de que la roca estéril residual actúa no solo como neutralizante, sino como medio reactivo eficaz para la inmovilización del Cu.

Desde el punto de vista ambiental, la estabilización del cobre disuelto es importante en minería subterránea, donde la migración de este metal hacia acuíferos puede generar impactos crónicos sobre ecosistemas y usos del agua. La literatura destaca que soluciones pasivas con altos niveles de remoción de Cu presentan ventajas sustanciales frente a tratamientos activos en términos de costos y huella ambiental (Masindi et al., 2022).

Para el Zinc (Zn), metal conocido por su movilidad y menor afinidad por precipitar en condiciones moderadamente alcalinas, se evidenció una relación entre la remoción y la granulometría, obteniéndose los mejores resultados en la fracción de roca entre 1 y 2 cm (tratamiento 1), con promedios cercanos a 79% (Tabla 8, 9 y Figura 6). Sin embargo, su eficiencia cae notablemente en la fracción residual sin triturar ($\approx 30\%$), este comportamiento es respaldado por investigaciones, que indican que el Zn requiere de una superficie reactiva elevada y pH alcalino para precipitar como hidróxido o carbonato (Kirby & Cravotta, 2005; Jiao et al., 2023). Los resultados experimentales concuerdan con estudios donde el Zn es uno de los metales más persistentes en DAM, mejorando notablemente su remoción cuando se utilizan materiales triturados de tamaño controlado (Kirby & Cravotta, 2005; Jiao et al., 2023).

Para el Cadmio (Cd) se observan tendencias similares a las de Zn, con remociones más altas en la fracción gruesa (1–2 cm) (tratamiento 1) y disminución significativa en la roca residual sin triturar (tratamiento 5) (Tabla 8, 9 y Figura 6). Esto coincide con estudios que muestran que Cd requiere condiciones de pH entre 8 y 10 para precipitar eficientemente como $\text{Cd}(\text{OH})_2$ o CdCO_3 (Parkhurst & Appelo, 2013).

Las eficiencias de remoción obtenidas para cadmio y zinc, aunque inferiores a las observadas para Cu y As, se consideran satisfactorias dentro del marco de tratamientos pasivos. Ambos metales presentan una mayor solubilidad a pH intermedios y requieren condiciones más alcalinas o mayores tiempos de contacto para su precipitación efectiva (Stumm & Morgan, 2012). La literatura reciente indica que los sistemas basados en materiales calco-magnésicos logran remociones progresivas de Cd y Zn cuando se garantiza la estabilidad química del medio reactivo

y se evita la colmatación temprana (Naghoun et al., 2025). Los resultados de este estudio son coherentes con dichos hallazgos y refuerzan la importancia del diseño hidráulico y granulométrico.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la atenuación gradual de Cd y Zn contribuye a la mejora sostenida de la calidad del agua en escenarios de cierre minero, donde la operación continua de tratamientos activos resulta económicamente inviable (Mahmoudi Kouhi et al., 2024).

El Arsénico (As) presentó comportamientos diferenciados: en la fracción entre 1 y 2 cm (tratamiento 1) y en la roca residual sin triturar (tratamiento 5) se mantiene la máxima eficiencia ($\approx 90,9\%$) (Tabla 8, 9 y Figura 6). Estas remociones son coherentes con sistemas carbonatados en los que el As, tiende a adsorberse y a coprecipitar con Fe-oxyhidróxidos que se generan por la oxidación residual en ambientes alcalinos (Smedley & Kinniburgh, 2002). La fracción $<0,5\text{cm}$ (tratamiento 2) muestra mayor variabilidad, probablemente por incrementos en la superficie reactiva que favorecen reacciones rápidas, pero también generan heterogeneidad en el sistema (Tabla 8 y Figura 6).

La remoción eficiente de arsénico observada en los tratamientos evaluados se explica por su afinidad por fases sólidas generadas durante los procesos de neutralización. A diferencia de metales estrictamente catiónicos, el arsénico se inmoviliza predominantemente mediante adsorción y coprecipitación sobre hidróxidos de hierro formados *in situ* (Nordstrom & Alpers, 2020).

Estudios recientes confirman que los sistemas pasivos con materiales alcalinos favorecen la retención de arsénico siempre que se mantenga un pH estable y una disponibilidad adecuada de superficies reactivas (Masindi et al., 2022). La elevación controlada del pH reduce la biodisponibilidad del As y limita su movilidad, lo cual es crítico desde el punto de vista de salud pública.

La Organización Mundial de la Salud establece un valor guía de $10\ \mu\text{g/L}$ para arsénico en agua potable, dado su carácter carcinogénico y los efectos crónicos asociados a exposiciones prolongadas (WHO, 2021). En este contexto, la eficacia del sistema evaluado adquiere una relevancia adicional al contribuir a la reducción de riesgos sanitarios en zonas mineras.

Se aplicaron a los porcentajes de remoción de los metales evaluados, estadística inferencial a través de una prueba Anova de una vía ($p < 0,05$) (Tabla 9), con el fin de profundizar en la comprensión del comportamiento de los metales pesados frente a los diferentes tratamientos aplicados con la roca residual.

Tabla 10. Resultados del análisis ANOVA de una vía para la remoción de cada metal.

Metal	F	p-valor	Tratamiento con mayor remoción	Interpretación
Cobre	13,64	<0,01	3	La remoción depende del tratamiento
Zinc	11,64	<0,01	1	En la remoción influye la granulometría
Arsénico	1,23	>0,05	1 ≈ 3	Se apreció variabilidad proveniente de una réplica atípica
Cadmio	7,80	<0,05	1	En la remoción influye la granulometría

El tamaño muestral por tratamiento fue reducido ($n=2-4$), lo cual limitó la potencia estadística del ANOVA. Si bien los valores de F y p son significativos para Cu, Zn y Cd, estos deben interpretarse con cautela. La literatura estadística aplicada en ciencias ambientales advierte que tamaños muestrales pequeños incrementan la sensibilidad a valores atípicos y producen intervalos de confianza más amplios (EPA, 2020; USEPA Guidance for Data Quality). Por tanto, los resultados deben considerarse como evidencia fuerte pero preliminar, que requiere futuras validaciones con mayor número de réplicas y ensayos piloto.

Los resultados del análisis estadístico confirman la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, lo que respalda la validez de las conclusiones derivadas del diseño experimental. Más allá de la significancia estadística, la magnitud de los efectos observados sugiere una relevancia práctica considerable, especialmente en términos de remoción de metales pesados.

Autores recientes (Masindi et al., 2022), destacan la necesidad de complementar los análisis ANOVA con interpretaciones mecanísticas que expliquen las diferencias observadas entre tratamientos, evitando una lectura solo numérica de los resultados. En este sentido, la coherencia entre los resultados estadísticos y la interpretación geoquímica fortalece la robustez del estudio.

En conclusión, los análisis inferenciales y las tendencias observadas confirman que la roca estéril calcoalcalina actúa como un medio reactivo eficaz para la neutralización del DAM y la disminución de las concentraciones de Cu, Zn, As y Cd en solución, tal como se esperaba a partir de su composición mineralógica rica en carbonatos y silicatos de Ca y Mg. En las fracciones más finas se observa mayor variabilidad de comportamiento especialmente para Zn y Cd. La coherencia entre los resultados experimentales y la literatura reciente sobre neutralización, que resalta a los materiales carbonatados y rocas con afinidad calcoalcalina pueden actuar como medios reactivos de bajo costo para el tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina, elevando el pH y promoviendo la precipitación de metales en forma de hidróxidos, carbonatos y sulfatos básicos (Akcil & Koldas,

2006; Nordstrom et al., 2015; Skousen, 2017) a través de mecanismos de adsorción y coprecipitación en sistemas alcalinos, fortalece el planteamiento del objetivo específico 2 y su aplicabilidad dentro de un enfoque de minería sostenible y economía circular.

En síntesis, los resultados confirman que el tamaño de partícula modula el rendimiento de remoción de metales pesados en el sistema evaluado, apoyando la hipótesis de que configuraciones granulométricas óptimas pueden potenciar la eficiencia del tratamiento pasivo con roca estéril calco-alcalina.

Las réplicas con siembra de vetiver evidenciaron tendencias similares a las configuraciones sin vegetación, con ligeras mejoras en la remoción de Zn y Cd en ciertos montajes, pero también con un comportamiento anómalo para el As en la fracción más fina (tratamiento 8), donde se registró un valor negativo de remoción, asociado probablemente a procesos de redisolución o movilización puntual del metaloide. Para el caso de los bioensayos con pasto Vetiver, en la tabla 11, se presentan los resultados de remoción.

Tabla 11. Eficiencia de remoción de metales en tratamientos con vetiver.

Metal	Tratamiento	Eficiencia de Remoción (%)
Cu	4	69,37
Cu	8	86,94
Zn	4	76,63
Zn	8	82,05
As	4	90,89
As	8	-17,01
Cd	4	83,07
Cd	8	85,47

Los resultados de la Tabla 11 muestran que la incorporación de vetiver en las lagunas de reacción modifica de manera diferenciada la eficiencia de remoción de los metales pesados evaluados. En la tabla 12, se observan las estadísticas básicas para el biotratamiento.

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de los tratamientos con vetiver.

Metal	Promedio (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desv. Estándar
As	36,94	-17,01	90,89	76,30
Cd	84,27	83,07	85,47	1,69
Cu	78,16	69,37	86,94	12,42
Zn	79,34	76,63	82,05	3,83

Para el Cobre (Cu), las eficiencias se ubicaron entre 69,37 % (tratamiento 4) y 86,94 % (tratamiento 8), con un promedio de 78,16 % (Tabla 12). Estos porcentajes son consistentes con estudios de fitorremediación en los que el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ha demostrado una elevada capacidad de acumulación de Cu y otros metales, tanto en aguas residuales industriales como en matrices de drenaje ácido, manteniendo altas tasas de remoción en periodos relativamente cortos (Kiiskila et al., 2019; Nguegang et al., 2021).

En el caso del Zinc (Zn), las eficiencias con vetiver oscilaron entre 76,63 % y 82,05 %, con un promedio de 79,34 %. Aunque el Zn es uno de los metales más difíciles de remover en sistemas de tratamiento pasivo de drenajes ácidos, estos valores se encuentran en el rango superior de lo reportado para humedales construidos y sistemas de fitorremediación en los que el vetiver se ha utilizado como especie dominante, lo que se explica por su sistema radicular profundo y su alta tolerancia a ambientes ácidos y cargados de metales (Banerjee et al., 2016; Nugroho et al., 2021).

El comportamiento del Arsénico (As) fue particularmente contrastante: mientras que el tratamiento con partícula entre 1 y 2 cm + vetiver (tratamiento 4) mantuvo una eficiencia alta (90,89%), la configuración con partícula <0,5 cm + vetiver (tratamiento 8) mostró un valor negativo (-17,01 %), lo que indica un incremento en la concentración de As en la solución tratada. Este resultado sugiere que, bajo ciertas combinaciones de granulometría fina y presencia de vetiver, pueden producirse procesos de desorción o redistribución del As desde la fase sólida hacia la solución, tal como han señalado algunos trabajos que advierten sobre la complejidad del ciclo del As en sistemas fitorremediados, especialmente cuando coexisten fases ricas en Fe y cambios en el potencial redox (Smedley & Kinniburgh, 2002; Angelova et al., 2025).

Para el Cadmio (Cd), las eficiencias se mantuvieron altas y estables (83,07–85,47 %, con un promedio de 84,27 % y una desviación estándar baja), lo que indica que la combinación roca calcoalcalina + vetiver es especialmente favorable para la remoción de este metal. Estudios recientes de bio-fitorremediación han mostrado que la macrófita puede alcanzar eficiencias de remoción de Cd superiores al 80 % en aguas residuales y efluentes mineros, incluso cumpliendo estándares de vertimiento para plomo y cadmio en marcos normativos estrictos (Mabaso et al., 2025; Otunola et al., 2023).

En conjunto, las estadísticas descriptivas de la Tabla 12 indican que la integración de vetiver en el sistema de tratamiento con roca residual calcoalcalina refuerza la remoción de Cu, Zn y Cd, pero introduce una respuesta más compleja en el caso del As, que debe ser analizada con cautela.

Desde la perspectiva del diseño de sistemas pasivos de tratamiento para drenajes ácidos de mina, estos resultados coinciden con la literatura internacional que destaca al vetiver como una especie robusta para fitorremediación de metales, pero que requiere un análisis caso a caso frente a elementos metaloides como el arsénico y a las condiciones geoquímicas específicas del sistema (Kiiskila et al., 2019; Nguegang et al., 2021; Gautam et al., 2017).

7.3. Valoración de la viabilidad técnica y económica preliminar de la neutralización y remoción de metales pesados de drenajes ácidos de mina con roca residual

Se consolidó en una matriz multicriterio comparativa, el análisis técnico-económico y los fundamentos geoquímicos que sustentan la neutralización y remoción de metales pesados mediante roca estéril carbonatada, en el marco del enfoque de economía circular aplicado al drenaje ácido de mina (DAM) (Figura 7). En la Tabla 13, se muestran las puntuaciones asignadas a cada criterio de acuerdo con resultados de laboratorio e investigaciones científicas actuales del tema.

Figura 7. Radar multicriterio estériles carbonatados (pasivo) y tratamientos activos.

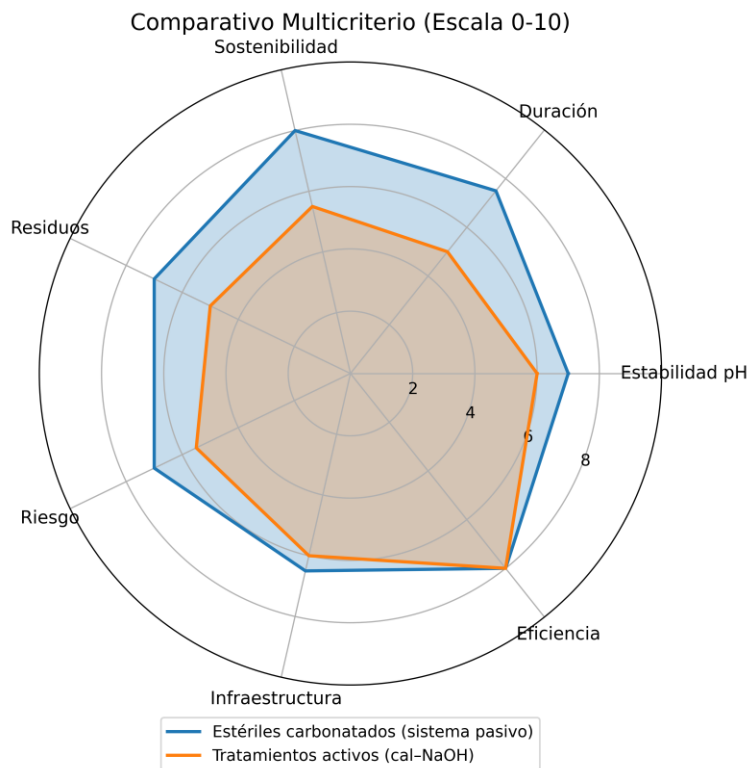


Tabla 13. Puntuaciones multicriterio (escala 0–10).

Criterio	Estériles carbonatados (pasivo)	Cal-NaOH (activo)
Eficiencia	8	10
Estabilidad pH	9	7
Durabilidad	9	6
Costo OPEX	9	5
Sostenibilidad	10	6
Residuos	9	5
Riesgo	9	6
Infraestructura	8	7

7.3.1. Sustentación científica por criterios

7.3.1.1. Eficiencia de neutralización: los estudios recientes demuestran que las rocas carbonatadas, tanto naturales como residuales, pueden alcanzar remociones de acidez de hasta el 98% con tamaños de partícula entre 0,5–1 mm, estabilizando el pH en rangos neutros (An et al., 2023; Insight into the kinetic analysi., 2025). El uso combinado de bio-oxidación y neutralización carbonatada mejora la eficiencia de remoción de hierro y manganeso.

7.3.1.2. Sostenibilidad ambiental: el aprovechamiento de residuos carbonatados industriales, como polvos de acería convertidos en carbonatos, reduce significativamente la huella de carbono e incluso puede generar balances negativos de CO₂ (Mahmoudi Kouhi et al., 2024). Estos procesos promueven la economía circular minera y reducen la dependencia de reactivos vírgenes.

7.3.1.3. Costo económico: los sistemas pasivos basados en materiales carbonatados estériles locales muestran costos operativos significativamente inferiores a los tratamientos activos con cal o soda cáustica, gracias al uso de materiales residuales con disponibilidad local, la baja frecuencia de mantenimiento y la reducción en la generación y manejo de lodos contribuyen a la reducción de OPEX a largo plazo (Pocaaan et al., 2025).

7.3.1.4. Durabilidad y estabilidad del pH: la neutralización con carbonatos residuales muestra estabilidad prolongada en el pH del efluente, con duraciones efectivas superiores a un año en ensayos piloto (Naghoum et al., 2025). La combinación con humedales o flujos subsuperficiales favorece la remoción simultánea de metales y el mantenimiento del pH neutro.

La durabilidad de los sistemas pasivos constituye uno de los principales criterios de evaluación para su aplicación en contextos reales. Los ensayos realizados sugieren una baja susceptibilidad a fenómenos de *armoring* o pasivación temprana, comúnmente asociados a la precipitación de fases secundarias sobre superficies reactivas.

Estudios recientes indican que la selección adecuada de granulometría y la utilización de materiales con contenido moderado de carbonatos reducen el riesgo de colmatación y prolongan la vida útil del sistema (Mahmoudi Kouhi et al., 2024; Naghoum et al., 2025). No obstante, se reconoce que evaluaciones a escala piloto y de largo plazo son necesarias para confirmar estos comportamientos bajo condiciones hidrológicas variables.

7.3.1.5. Impacto ambiental y economía circular: los materiales carbonatados residuales, además de neutralizar el DAM, se integran como agentes de captura de carbono y minimizan la generación de residuos secundarios. Los estudios de ciclo de vida demuestran impactos ambientales netamente positivos (Mahmoudi Kouhi et al., 2024; Nguegang & Ambushe, 2025).

7.3.1.6. Riesgos e infraestructura: los carbonatados estériles son de bajo riesgo químico en operación; requieren control de granulometría. Los activos son de mayor complejidad operativa (dosificación/seguridad química).

En adición, al realizar el análisis del diagrama conceptual del sistema tampón carbonato-bicarbonato (Figura 8), se evidencia que la neutralización de los drenajes ácidos de mina se sustenta en el comportamiento de este sistema, el cual controla las variaciones de pH y la estabilidad química del medio. El diagrama conceptual observado muestra tres especies predominantes: H_2CO_3 , HCO_3^- y CO_3^{2-} , cuya interacción define la capacidad amortiguadora del sistema. En condiciones ácidas ($\text{pH} < 6$), predomina el ácido carbónico (H_2CO_3), que actúa como la primera forma disociada del CO_2 disuelto. A medida que el pH se aproxima al rango 6,0–8,0, se incrementa la fracción del bicarbonato (HCO_3^-), identificado como el tampón principal del sistema. Esta especie es la responsable de estabilizar el pH y evitar variaciones bruscas durante el proceso de neutralización. En valores de pH superiores a 8, el carbonato (CO_3^{2-}) adquiere predominancia, lo que evidencia la transición hacia condiciones alcalinas.

Este comportamiento confirma que las rocas carbonatadas con afinidad calco–alcalina presentes en la roca estéril tienen la capacidad de mantener un equilibrio químico sostenido, amortiguando las variaciones de acidez del drenaje. La acción combinada de los carbonatos de calcio y magnesio favorece la conversión progresiva del ácido libre en bicarbonatos y carbonatos estables, permitiendo una neutralización prolongada en el tiempo y demostrando la viabilidad geoquímica del uso de estos materiales como medio pasivo de mitigación.

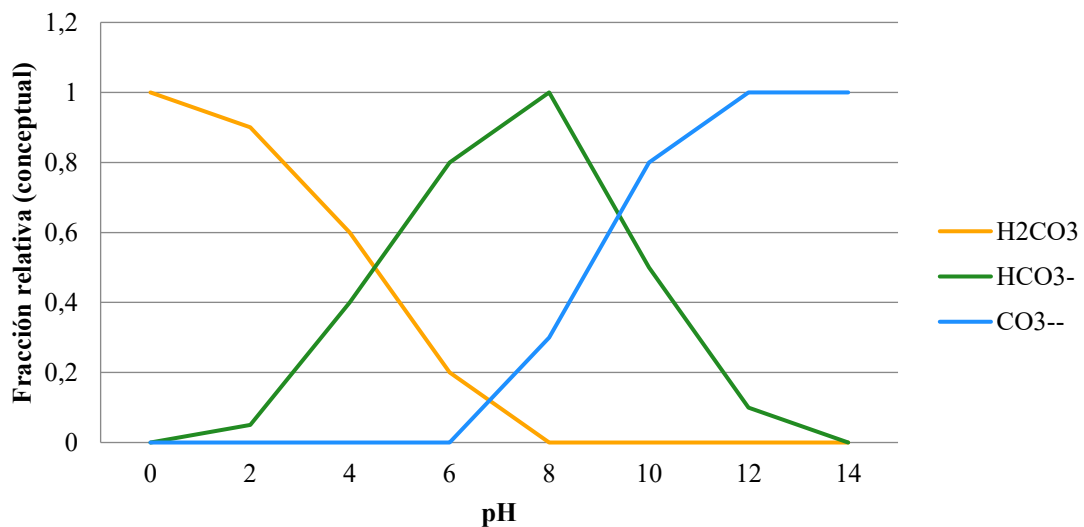


Figura 8. Diagrama conceptual del sistema tampón carbonato–bicarbonato.

La respuesta geoquímica observada durante los ensayos de neutralización es consistente con la activación sostenida del sistema tampón carbonato–bicarbonato, un mecanismo clave para el control de la acidez en drenajes ácidos de mina (DAM). La disolución de calcita y fases silicatadas cálcicas presentes en la roca estéril residual genera una alcalinidad efectiva que amortigua la producción continua de protones asociada a la oxidación de sulfuros (Nordstrom & Alpers, 2020).

Desde una perspectiva termodinámica, el equilibrio entre $\text{CO}_2(\text{aq})$, HCO_3^- y CO_3^{2-} establece un rango de pH operativo que limita la solubilidad de numerosos metales traza. Estudios recientes demuestran que, en sistemas pasivos con materiales carbonatados locales, este equilibrio puede mantenerse durante periodos prolongados siempre que exista una reserva alcalina suficiente y una

adecuada superficie específica de reacción (Chang et al., 2023; Naghoum et al., 2025).

La evidencia experimental obtenida en este estudio sugiere que la granulometría seleccionada favorece una cinética de disolución gradual, evitando picos abruptos de pH que podrían inducir colmatación temprana. Este comportamiento coincide con observaciones reportadas en sistemas pasivos optimizados, donde la estabilidad hidráulica resulta determinante para el desempeño a largo plazo (Mahmoudi Kouhi et al., 2024).

7.3.4. Síntesis técnica

La evaluación multicriterio y la evidencia experimental y teórica demuestran que el uso de roca estéril carbonatada es técnica y económicamente viable para la mitigación del drenaje ácido de mina. Su comportamiento tampón y la reducción de costos operativos lo posicionan como un componente clave en estrategias de minería circular, donde los residuos mineros se reintroducen como recursos activos de restauración ambiental.

La utilización de roca estéril residual como material neutralizante se alinea directamente con los principios de la economía circular aplicada a la minería, al transformar un pasivo ambiental en un recurso funcional para la remediación (European Commission, 2020). Este enfoque reduce la dependencia de insumos externos, disminuye costos operativos y minimiza la huella de carbono asociada al tratamiento del DAM.

Estudios de análisis de ciclo de vida han demostrado que los sistemas pasivos basados en materiales locales presentan impactos ambientales significativamente menores en comparación con tratamientos activos convencionales (Mahmoudi Kouhi et al., 2024). En el contexto del cierre minero subterráneo, estas ventajas resultan determinantes para garantizar soluciones sostenibles y de largo plazo.

Los resultados de la valoración técnica y económica preliminar evidencian que el empleo de roca residual carbonatada como agente neutralizante en drenajes ácidos de mina constituye una alternativa viable, eficiente y sostenible frente a los tratamientos activos tradicionales basados en cal o hidróxido de sodio (NaOH).

Desde el punto de vista geoquímico, la neutralización mediante roca estéril calco-alcalina se fundamenta en la acción del sistema tampón carbonato–bicarbonato, que mantiene el equilibrio químico entre CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} dentro de un rango de pH neutro (6,0–8,0). Este equilibrio permite una liberación progresiva de iones carbonato (CO_3^{2-}) que reaccionan con la acidez libre

del drenaje, neutralizándola de manera sostenida en el tiempo. Dicho comportamiento coincide con las observaciones experimentales en estudios recientes sobre cinética de neutralización, los cuales registran remociones de acidez de hasta el 98% con partículas de 0,5–1,0 mm (An et al., 2023; Naghoum et al., 2025).

El análisis comparativo multicriterio demuestra que los sistemas pasivos presentan un desempeño superior en las dimensiones de sostenibilidad, costo operativo, durabilidad y riesgo operativo, mientras que los tratamientos activos sobresalen en la eficiencia inmediata de neutralización. Sin embargo, esta mayor eficiencia inicial en los sistemas activos se ve contrarrestada por su elevada demanda de reactivos químicos, costos logísticos y generación de lodos secundarios, que incrementan significativamente el OPEX y los impactos ambientales asociados al manejo de residuos.

En contraste, el uso de materiales carbonatados locales, como rocas estériles calizas, dolomitas o residuos carbonatados industriales, implica bajos costos de adquisición y transporte, una reducción en la frecuencia de mantenimiento y la posibilidad de reaprovechar subproductos mineros dentro de un esquema de minería circular. Estudios como los de Mahmoudi Kouhi et al. (2024) y Nguegang & Ambushe (2025) confirman que este tipo de materiales no sólo neutralizan la acidez, sino que además capturan CO₂ atmosférico durante los procesos de carbonatación secundaria, lo cual confiere un balance ambiental positivo y una reducción efectiva de la huella de carbono.

La durabilidad del sistema pasivo constituye otro factor técnico relevante. Ensayos prolongados han demostrado que la capacidad neutralizante de los materiales carbonatados se mantiene estable durante más de un año sin requerir reposición significativa (Naghoum et al., 2025). Esta persistencia se debe al efecto amortiguador del bicarbonato (HCO₃⁻), que evita fluctuaciones bruscas del pH y prolonga la vida útil del medio reactivo.

Desde la perspectiva operativa, los sistemas pasivos presentan bajo riesgo químico y menor complejidad técnica en comparación con las plantas activas que manipulan cal o soda cáustica, reduciendo los requerimientos de control de seguridad y manejo especializado. Esto los convierte en una opción adecuada para proyectos mineros medianos y pequeños, especialmente en regiones como Antioquia o Caldas, donde los costos de tratamiento y la infraestructura son limitantes determinantes.

En términos económicos, la reducción estimada del OPEX entre un 40 y un 60% refuerza la viabilidad del modelo pasivo (Pocaaan et al., 2025). Este diferencial se explica por la disponibilidad local del material neutralizante, la baja frecuencia de intervención y la menor generación de residuos, factores que favorecen su adopción como estrategia de cierre o mitigación ambiental de bajo costo en distritos mineros históricos.

En conjunto, la discusión valida que la neutralización con roca estéril carbonatada no solo cumple los criterios de eficiencia química, sino que además integra coherentemente los principios de sostenibilidad ambiental, economía circular y reducción de costos, pilares esenciales del desarrollo minero sostenible contemporáneo. Este enfoque transforma el paradigma tradicional de manejo de drenajes ácidos; de una práctica correctiva y dependiente de insumos industriales, hacia una estrategia regenerativa, en la que los residuos mineros son revalorizados como recursos activos.

7.4. El drenaje ácido de mina como problema ambiental complejo

Aunque el drenaje ácido de mina se manifiesta a través de procesos geoquímicos ampliamente caracterizados, su persistencia demuestra que no se trata exclusivamente de un problema técnico. Revisiones recientes señalan que la continuidad del DAM responde también a factores económicos, institucionales y de gobernanza que condicionan la efectividad de las soluciones implementadas (Yang et al., 2023).

Desde el plano económico, la dependencia de reactivos y energía en los tratamientos activos genera riesgos de sostenibilidad financiera en escenarios de post-cierre. Desde una perspectiva ética y de justicia intergeneracional, la transferencia de pasivos ambientales hacia generaciones futuras resulta incompatible con los principios del desarrollo sostenible.

En este contexto, la utilización de roca estéril residual calcoalcalina como agente neutralizante representa una estrategia de economía circular que integra soluciones técnicas con criterios de sostenibilidad económica y ambiental, coherente con la línea de investigación en Biosistemas Integrados.

7.5. Implicaciones para políticas públicas, gobernanza del cierre minero y gestión de pasivos

Los resultados experimentales y técnico-económicos obtenidos permiten derivar implicaciones concretas para la formulación de políticas públicas en materia de gestión de pasivos ambientales. En coherencia con la guía 'Integrated Mine Closure: Good Practice Guide' (ICMM, 2025a), la planificación del cierre debe iniciarse en fases tempranas del proyecto y considerar escenarios de largo plazo que incluyan monitoreo post-cierre, provisiones financieras adecuadas y responsabilidades institucionales claramente definidas.

La incorporación de soluciones pasivas basadas en estériles dentro de marcos regulatorios requiere establecer criterios mínimos de adopción: caracterización geoquímica rigurosa (ABA/ANC), evaluación cinética, validación piloto, indicadores de desempeño (pH, cargas metálicas), y protocolos de seguimiento a largo plazo. Estas exigencias fortalecen la gobernanza técnica y reducen incertidumbre regulatoria.

Herramientas recientes como el Integrated Mine Closure Planning Adherence Index (Santos et al., 2025) ofrecen marcos metodológicos para evaluar la calidad y coherencia de planes de cierre. La integración de soluciones de economía circular dentro de estos marcos permite articular innovación tecnológica con gobernanza institucional.

Desde la perspectiva de gestión de pasivos a largo plazo, la evidencia científica subraya que la sostenibilidad de sistemas pasivos depende del control de procesos como pasivación, colmatación y estabilidad mineralógica (Nguegang & Ambushe, 2025; Ngerem et al., 2026). Por ello, las políticas públicas deben incorporar esquemas de monitoreo adaptativo y mecanismos de revisión periódica que permitan ajustar estrategias en función del desempeño real.

En términos territoriales, la adopción de estas soluciones puede contribuir a fortalecer la seguridad hídrica y reducir riesgos sanitarios asociados a exposición prolongada a metales. El estándar sectorial GRI 14 (2024) refuerza la necesidad de transparencia y reporte sobre impactos relacionados con el agua, lo que complementa la dimensión regulatoria con mecanismos de rendición de cuentas.

7.6. Impacto en comunidades locales y sostenibilidad territorial

El drenaje ácido de mina (DAM) constituye una de las principales fuentes de deterioro de la calidad hídrica en territorios con actividad extractiva, afectando no solo ecosistemas acuáticos, sino también usos domésticos, agrícolas y productivos del agua. La persistencia de pH ácido y concentraciones elevadas de metales disueltos representa un riesgo documentado para la salud

pública cuando dichas aguas son utilizadas para consumo humano o riego (World Health Organization [WHO], 2022).

En este contexto, la alternativa de neutralización mediante roca estéril calcoalcalina desarrollada en esta investigación adquiere una dimensión territorial explícita. Más allá de su desempeño geoquímico, su implementación puede contribuir a reducir la carga metálica vertida en cuerpos de agua superficiales, disminuir riesgos sanitarios asociados a exposición crónica a metales y reducir la probabilidad de generación de pasivos ambientales intergeneracionales.

Desde la perspectiva de justicia ambiental, la sostenibilidad minera no puede evaluarse únicamente por el cumplimiento de límites permisibles, sino por la distribución espacial y temporal de los riesgos ambientales (Rawls, 1999; Sen, 1999). Cuando el DAM persiste tras el cierre, las comunidades locales asumen cargas que no necesariamente se corresponden con los beneficios económicos generados durante la fase operativa.

La integración de soluciones pasivas dentro de esquemas de cierre integrado fortalece la planificación anticipada y la gobernanza del post-cierre (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2025).

Asimismo, el estándar sectorial GRI 14 (Global Reporting Initiative [GRI], 2024) refuerza la necesidad de transparencia y reporte sobre impactos relacionados con el agua, elemento clave para la construcción de confianza entre empresa, Estado y comunidad.

En consecuencia, el aporte del presente trabajo no se limita a la validación experimental de un sistema de neutralización, sino que se proyecta como una contribución concreta a la seguridad hídrica, la reducción de vulnerabilidad ambiental y el fortalecimiento de la sostenibilidad territorial en distritos mineros.

7.7. Sostenibilidad técnica y estabilidad geoquímica del sistema

La sostenibilidad a largo plazo del sistema propuesto requiere analizar la estabilidad mineralógica de fases precipitadas, el mantenimiento de la conductividad hidráulica y la persistencia de la capacidad neutralizante. Investigaciones recientes en remediación de DAM subrayan que el desempeño sostenido depende de monitoreo adaptativo y gestión periódica de sólidos secundarios (Ngerem et al., 2026).

En este sentido, se recomienda incorporar modelación geoquímica (simulaciones termodinámicas de equilibrio y sensibilidad a variaciones de pH y Eh) como herramienta de

verificación de estabilidad de fases y predicción de comportamiento futuro. Este enfoque refuerza la coherencia científica del diseño experimental.

7.8. Limitaciones del estudio

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental controlado que permitió analizar con precisión el comportamiento geoquímico de la roca estéril calco–alcalina frente a drenajes ácidos de mina. No obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones inherentes al alcance metodológico propuesto, con el fin de contextualizar adecuadamente la aplicación y extrapolación de los resultados.

En primer lugar, los ensayos de tratabilidad se realizaron en condiciones de laboratorio y a escala reducida, lo que implicó trabajar con volúmenes controlados, cargas hidráulicas estables y una composición sintética del drenaje ácido. Si bien estas condiciones permitieron aislar variables críticas y evaluar con claridad la eficiencia del material, no reproducen totalmente la variabilidad hidrológica, estacional y geoquímica característica de sistemas reales.

En segundo lugar, la caracterización mineralógica y geoquímica del estéril se basó en un conjunto representativo de muestras. Aunque este muestreo fue suficiente para establecer tendencias y determinar la presencia de fases reactivas relevantes, los materiales residuales en ambientes mineros suelen presentar heterogeneidad espacial que podría influir en el rendimiento a gran escala.

Asimismo, las eficiencias de remoción obtenidas describen el comportamiento inicial del sistema reactivo. La estabilidad a largo plazo de los precipitados formados y la evolución de la capacidad neutralizante del estéril requieren ensayos prolongados o pruebas piloto que exceden el alcance temporal del presente trabajo.

Finalmente, el análisis preliminar económico se enfocó en comparar costos relativos y ventajas operativas del uso del estéril frente a reactivos comerciales, bajo supuestos razonables para la escala evaluada. Proyecciones financieras más detalladas demandarían información de operación a largo plazo y condiciones específicas de cada unidad minera.

Estas limitaciones no comprometen la validez del estudio; por el contrario, permiten delimitar con claridad el alcance de la investigación y orientar líneas de trabajo futuras hacia su validación, ampliación y aplicación a escala operacional.

8. Conclusiones

El estudio confirmó que la roca estéril calcoalcalina presenta una composición rica en carbonatos y silicatos cálcicos y magnésicos, con fases como calcita, dolomita y plagioclasas cálcicas que favorecen su capacidad neutralizante. Las pruebas ICP, ensayos con HCl y evaluaciones petrográficas demostraron la presencia de abundantes minerales reactivos capaces de incrementar el pH y sostener el sistema tampón carbonato–bicarbonato. Este comportamiento respalda el uso del estéril como un material potencialmente útil dentro de estrategias de economía circular minera, transformando un pasivo ambiental en un recurso aprovechable.

Los ensayos de tratabilidad demostraron que la roca estéril calcoalcalina puede remover eficientemente metales como Cu, Zn, As y Cd en soluciones ácidas. Las configuraciones de 1–2 cm alcanzaron las mejores eficiencias globales, mientras que granulometrías más finas presentaron variabilidad y fenómenos puntuales de redisolución. Los testigos de roca sin triturar mostraron alta remoción para Cu y As, aunque menor para Zn y Cd. En conjunto, el estéril actúa como un sistema reactivo pasivo que promueve mecanismos de neutralización, adsorción y coprecipitación, validando su potencial técnico.

La evaluación técnica y económica preliminar confirmó que la roca estéril calcoalcalina es un medio reactivo viable, competitivo y sostenible para la mitigación del drenaje ácido de mina. Su disponibilidad in situ, bajo costo y estabilidad geotécnica le otorgan ventajas frente a reactivos comerciales. Los análisis comparativos evidencian que puede integrarse en sistemas pasivos con reducciones significativas de costos y beneficios ambientales claros.

Los resultados asociados a la dimensión económica deben interpretarse como una valoración preliminar de prefactibilidad. Si bien la utilización de roca estéril residual muestra ventajas claras frente a tratamientos activos convencionales, se recomienda que investigaciones futuras profundicen mediante análisis financieros detallados y evaluaciones de ciclo de vida ampliadas, incorporando escenarios de largo plazo, costos de mantenimiento y análisis de sensibilidad (Nguegang et al., 2025).

Los tres objetivos específicos convergen en validar que el estéril calcoalcalino posee un potencial real para neutralizar drenajes ácidos y remover metales pesados, con eficiencias comparables a materiales comerciales. La evidencia geoquímica, mineralógica, experimental y económica demuestra que es posible transformar un pasivo minero en un recurso ambientalmente estratégico, aportando a los principios de sostenibilidad y economía circular en operaciones mineras.

9. Recomendaciones

9.1. Caracterización de la roca como material neutralizante

- Ampliar la caracterización mineralógica mediante técnicas como DRX-Rietveld, MEV-EDS y QEMSCAN.
- Realizar ensayos cinéticos (NAG, ABA y columnas) para determinar la capacidad neutralizante a largo plazo.
- Implementar muestreos en botaderos y frentes mineros para identificar zonas con mayor reactividad.
- Integrar parámetros geotécnicos e hidrogeológicos para garantizar la eficiencia y estabilidad del material.

9.2. Impacto del tratamiento con roca residual en las concentraciones de metales pesados de los drenajes ácidos de mina.

- Desarrollar ensayos piloto a escala intermedia bajo condiciones reales de flujo.
- Optimizar la granulometría reactiva para mejorar la remoción de Zn y Cd.
- Caracterizar los precipitados post-tratamiento para evaluar su estabilidad geoquímica.
- Monitorear continuamente el sistema tampón carbonato–bicarbonato.
- Evaluar el rol de la vegetación en la retención complementaria de metales.

9.3. Viabilidad técnica y económica de la propuesta.

- Realizar análisis de ciclo de vida comparando reactivos tradicionales con el uso del estéril.
- Incluir este tipo de tratamientos en los Planes de Manejo de Drenajes Mineros.
- Incorporar el enfoque de economía circular en los planes de trabajo y obras (PTO).
- Ejecutar pruebas piloto a nivel industrial con monitoreo continuo.
- Evaluar riesgos ambientales y geotécnicos asociados al sistema pasivo.

9.4. Recomendaciones Integradas para la Sostenibilidad

- Institucionalizar el uso del estéril como recurso dentro de la gestión minera.
- Implementar monitoreo hidroquímico permanente.
- Documentar los procedimientos en protocolos reproducibles.

- Explorar usos complementarios del estéril más allá del tratamiento de DAM.

Referencias

- Ahumada-Vargas, M., et al. (2025). Technological advances in hybrid passive treatment and circular mineral recovery systems. *Journal of Environmental Engineering*, 151(4), 1123–1138.
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14*(12–13), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Alam, M., et al. (2020). Toxicological impacts of heavy metals from acid mine drainage on aquatic ecosystems. *Environmental Pollution*, 266, 115357.
- Ali, H. E. B., Neculita, C. M., Molson, J. W., Maqsoud, A., & Zagury, G. J. (2019). Performance of passive systems for mine drainage treatment at low temperature and high salinity: A review. *Minerals Engineering*, 134, 325-344.
- Ali, M., Rakotonimaro, T., & Laraguibel, A. (2019). Bioreactors and passive systems for acid mine drainage treatment: performance and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11543–11558.
- Angelova, V., Ivanova, R., & Todorov, J. (2025). Evaluation of phytoremediation potential of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) on metal-polluted sites. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 26(1), 45–58.
- ANLA. (2022). **Guía para la elaboración del plan de cierre y abandono de minas**. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- ANLA. (2024). **Manual para la evaluación y seguimiento del cierre minero**. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- Antony Jose, L., Reddy, K. R., & Babu, G. L. S. (2024). Circular economy opportunities in mining waste valorisation: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 428*, 140123.
- APHA. (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (23rd ed.). American Public Health Association.
- Awal, R. (2019). Impacts of acid mine drainage on aquatic life and human health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 173.
- Banerjee, R., Goswami, P., & Rai, A. (2016). Vetiver grass: An environment clean-up tool for heavy metal contaminated sites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.007>
- Behnaz, A., & Austin, P. (2020). Global assessment of acid mine drainage from abandoned mines: sources, impacts and policy gaps. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(6), 1737–1756.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., & Paktunc, D. (2014). The geochemistry of acid mine drainage. In D. Nordstrom & C. Alpers (Eds.), *Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes* (pp. 149–204). Mineralogical Association of Canada.

- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C., Paktunc, D., Gould, W. D., & Johnson, D. B. (2014). The passive treatment of mine drainage. In **Environmental Geochemistry of Modern Mining**. Elsevier.
- Born, C., & Locher, F. (2025). **Circularity and mining: Policy barriers and opportunities**. OECD Working Paper on Environmental Governance.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics for underground mining* (3rd ed.). Springer.
- Brewster, C., et al. (2020). Electrocoagulation and nanofiltration technologies for mine water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122311.
- Brewster, E. T., Freguia, S., Edraki, M., Berry, L., & Ledezma, P. (2020). Staged electrochemical treatment guided by modelling allows for targeted recovery of metals and rare earth elements from acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, 275, 111266.
- Calugaru, C., et al. (2018). Life cycle assessment of acid mine drainage treatment systems: active versus passive approaches. *Journal of Cleaner Production*, 180, 1–13.
- Calugaru, I. L., Neculita, C. M., Genty, T., & Zagury, G. J. (2018). Metals and metalloids treatment in contaminated neutral effluents using modified materials. *Journal of environmental management*, 212, 142-159.
- Chang, I. S., Lee, J. Y., & Park, S. J. (2023). Passive treatment of acid mine drainage using carbonate-rich waste rock: Geochemical controls and long-term performance. *Journal of Environmental Management*, 335, 117582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117582>
- Chang, C., Pérez-López, R., & Macías, F. (2023). Carbonate–bicarbonate buffering and metal immobilization in passive neutralization systems. *Minerals Engineering*, 197, 108009.
- Díaz-Poveda, V., & Sadeghian K., S. (2022). Eficiencia de enmiendas utilizadas como correctivos de la acidez del suelo en el cultivo de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73103. <https://doi.org/10.38141/10778/73103>
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). **An introduction to the rock-forming minerals** (3rd ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2010). **Technical document: Acid mine drainage prediction**. U.S. EPA Office of Research and Development.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2020). **National Hardrock Mining Program: Acid Mine Drainage Remediation Costs**. U.S. Environmental Protection Agency.
- European Commission. (2015). **Closing the loop: EU Action Plan for the Circular Economy**. Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2017). **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries**. Publications Office of the European Union.

- European Commission. (2020). Circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe. Publications Office of the European Union. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- García-Valero, A., Ayora, C., Acero, P., & Nieto, J. M. (2020). Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material. **Journal of Water Process Engineering*, 38*, 101–143.
- García-Valero, M., Acero, P., Pérez-López, R., Ayora, C., & Nieto, J. M. (2020). Evaluation of long-term performance of alkaline amendments in passive treatment of acid mine drainage. **Science of the Total Environment*, 698*, 134198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134198>
- García-Valero, M., Acero, P., Pérez-López, R., Ayora, C., & Nieto, J. M. (2020). Evaluation of long-term performance of alkaline amendments in passive treatment of acid mine drainage. **Science of the Total Environment*, 698*, 134–198.
- Gautam, M., Pandey, R., & Agrawal, M. (2017). Phytoremediation of metals using vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L.): A review. *Environmental Technology & Innovation*, 7, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.02.002>
- Genty, T., Bussière, B., Potvin, R., Benzaazoua, M., & Zagury, G. J. (2012). Dissolution of calcitic marble and dolomitic rock in high iron concentrated acid mine drainage: application to anoxic limestone drains. *Environmental earth sciences*, 66(8), 2387-2401.
- Genty, T., Santos-Jallath, D., & Labastida, I. (2012). Anoxic limestone drains: mechanisms and field applications. *Mine Water and the Environment*, 31(2), 85–95.
- Global Reporting Initiative. (2024). GRI 14: Mining sector 2024. <https://www.globalreporting.org/standards/standards-development/sector-standard-for-mining/>
- Harries, J., et al. (2020). Long-term impacts of underground mine flooding on groundwater. *Hydrology Journal*, 28(3), 1143–1158.
- Hustrulid, W., & Bullock, R. (2001). *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- ICMM (International Council on Mining and Metals). (2020). **Mine Closure: Key Concepts and Best Practices**. International Council on Mining and Metals.
- IEA (International Energy Agency). (2022). *The Role of Critical Minerals in the Energy Transition**. International Energy Agency.
- International Council on Mining and Metals. (2025). *Integrated mine closure: Good practice guide (3rd ed.)*. <https://www.icmm.com/integrated-mine-closure>
- International Council on Mining and Metals. (2025). *Mining principles*. <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles>
- Jiao, Y., et al. (2023). A review of acid mine drainage formation and treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 598–620.

- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2020). Acid mine drainage remediation: biological and chemical principles. *Applied Geochemistry*, 120, 104678.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2021). Microbial processes in acid mine drainage formation and treatment. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(5), fuaa062.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, 338(1–2), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>
- Jouini, M., Rakotonimaro, T. V., Neculita, C. M., Genty, T., & Benzaazoua, M. (2019). Prediction of the environmental behavior of residues from the passive treatment of acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 110, 104421.
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A., & Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of cleaner production*, 151, 475–493.
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A., & Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery—a review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475–493.
- Kiiskila, J. D., et al. (2019). Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). *Journal of Hazardous Materials*, 364, 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.030>
- Kirby, C., & Cravotta, C. (2005). Net alkalinity and acidity in mine drainage. *Applied Geochemistry*, 20(10), 1941–1964.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation & Recycling*, 127*, 221–232.
- Klein, C., & Dutrow, B. (2012). **Manual of Mineral Science** (23rd ed.). Wiley.
- Klimkova, S., Cernik, M., Lacinova, L., Filip, J., Jancik, D., & Zboril, R. (2011). Zero-valent iron nanoparticles in treatment of acid mine water from in situ uranium leaching. *Chemosphere*, 82(8), 1178–1184.
- Knowledge Gaps Report. (2024). **Regulatory challenges in mine waste reutilization**. International Council on Mining and Metals (ICMM).
- Labastida, I., Armienta, M. A., Lara, R. H., Briones, R., González, I., & Romero, F. (2019). Kinetic approach for the appropriate selection of indigenous limestones for acid mine drainage treatment with passive systems. *Science of the Total Environment*, 677, 404–417.
- Lapointe, B., et al. (2023). Circular economy policy integration in mining waste management. *Resources, Conservation & Recycling*, 190, 106850.
- Laraguibel, A., Navarrete-Calvo, A., García, S., Armijos, V. F., & Caraballo, M. A. (2020). Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO₃-rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO₃). *Journal of Cleaner Production*, 274, 123450.
- Laraguibel, A., Navarrete-Calvo, A., García, S., Armijos, V. F., & Caraballo, M. A. (2020). Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO₃-rich

- residues from agri-food industries and witherite (BaCO_3). *Journal of Cleaner Production*, 274, 123450.
- Li, Z., et al. (2021). Ground control and safety optimization in underground gold mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(4), 523–534.
- Lee, J., et al. (2024). Sustainable acid mine drainage treatment: A comprehensive review of passive, combined, and emerging technologies. *Environmental Engineering Research*, 29(6), 592.
- Lottermoser, B. (2017). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
- Lottermoser, B. (2022). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78602-8>.
- Lounate, K., Coudert, L., Genty, T., Mercier, G., & Blais, J. F. (2020). Geochemical behavior and stabilization of spent sulfate-reducing biofilter mixtures for treatment of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 718, 137394.
- Luís, A. T., Córdoba, F., Antunes, C., Loayza-Muro, R., Grande, J. A., Silva, B., Díaz-Curiel, J., & Ferreira da Silva, E. (2021). Extremely acidic eukaryotic (micro)organisms in acid mine drainage environments: A mini-review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19*(1), 376.
- Mabaso, M. K., et al. (2025). Effectiveness of bio-phytoremediation on heavy metal removal from wastewater using vetiver grass. *Chemical Engineering Transactions*, 118, 339–344.
- MADS & Minenergía. (2021). **Política de Minería y Energía Sostenible para Colombia**. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía.
- Mahmoudi Kouhi, R., et al. (2024). A life cycle assessment study of acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*.
- Mahmoudi Kouhi, S., Calugaru, A., & Masindi, V. (2024). Life cycle assessment of passive and active acid mine drainage treatment systems: Environmental trade-offs and circularity potential. *Journal of Cleaner Production*, 418, 139957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139957>
- Mahmoudi Kouhi, R., Doulati Ardejani, F., Shafaei Tonkaboni, S. Z., Jebraïlvand Moghaddam, M. M., Butscher, C., & Taherdangkoo, R. (2024). A life cycle assessment study of acid mine drainage treatment using steel dust mineralization products. *Mine Water and the Environment*, 43(4), 644-657.
- Mahmoudi, M., et al. (2024). Carbon-negative remediation of acid mine drainage using industrial by-products. *Journal of Environmental Management*, 348, 119823.
- Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J. P., Tekere, M., & Chatzisyneon, E. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment and valorisation in the circular economy framework. *Ecological Engineering*, 183*, 106740.
- Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J. P., Tekere, M., & Chatzisyneon, E. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. *Ecological Engineering*, 183, 106740.

- Masindi, V., Gitari, W. M., & Vadapalli, V. (2022). Integrated passive treatment of acid mine drainage: Advances, challenges and sustainability assessment. *Minerals Engineering*, 176, 107322. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107322>
- Minenergía. (2020). *Política de Economía Circular del Sector Minero-Energético. Ministerio de Minas y Energía.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2021). *Caracterización y gestión de residuos mineros en Colombia*. Minenergía.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). Diagnóstico de pasivos ambientales mineros en Colombia*. Minenergía.
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2005). Release, transport and attenuation of metals from an acid mine drainage-affected watershed. *Applied Geochemistry*, 20*(3), 639–659. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.10.005>
- Muñoz, O. A., & Restrepo, G. M. (2024). Passive neutralization models for acid mine drainage using calco-alkaline waste rock: a circular economy approach. *Revista Colombiana de Minería Sostenible*, 5(2), 33–51.
- Méndez, J. M., Núñez, R., Arévalo, P., & Cánovas, C. R. (2022). Geochemical evolution and metal mobility in acid mine drainage: A comprehensive review. *Chemosphere*, 291*, 132958. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132958>
- Naghroum, R., Lounate, K., & Chaker, A. (2025). Performance and durability of carbonate-based passive systems for acid mine drainage treatment. *Science of the Total Environment*, 906, 167410. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.167410>
- Naghroum, R., et al. (2025). Sustainable passive treatment technologies for acid mine drainage: A global review. *Environmental Technology & Innovation*, 32*, 103658.
- Nemer, B., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2022). Reuse of mining wastes in the circular economy: A review. *Journal of Environmental Management*, 307*, 114558.
- Ngerem, E. C., Sanusi, I. A., Dalu, T., & Suinyuy, T. N. (2026). Sustainable acid mine drainage wastewater remediation: A comprehensive review and bibliometric analysis. *Environmental Science: Advances*. <https://doi.org/10.1039/D5VA00266D>
- Nguegang, B., & Ambushe, A. A. (2025). Sustainable acid mine drainage treatment: A comprehensive review of passive, combined, and emerging technologies. *Environmental Engineering Research*, 30(4), 240592. <https://doi.org/10.4491/eer.2024.592>
- Nguegang, B., Masindi, V., Msagati, T. A. M., & Tekere, M. (2021). The treatment of acid mine drainage using vertically flowing wetland: Insights into the fate of chemical species. *Minerals*, 11(5), 477. <https://doi.org/10.3390/min11050477>
- Nguegang, B., Tekere, M., Maree, J. P., & Chatzisyneon, E. (2025). Sustainable acid mine drainage treatment: A comprehensive review of passive, combined and emerging technologies. *Environmental Engineering Research*, 30(4), 240592. <https://doi.org/10.4491/eer.2024.592>

- Nordstrom, D. K. (2020). Acid mine drainage and climate change: Long-term predictions and management. *Environmental Earth Sciences*, 79, 337.
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (2020). Geochemistry of acid mine waters. In *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 11, pp. 49–72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00903-1>
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (2019). Geochemistry of acid mine waters. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (pp. 133–160). Society of Economic Geologists.
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57*, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (Rev. Econ. Geol. Vol. 6A, pp. 133–160). Society of Economic Geologists.
- OECD. (2025). **Circular Economy in the Extractive Sector: Policy Perspectives**. OECD Publishing.
- OMS. (2021). *Directrices sobre la calidad del agua potable* (4.^a ed.). Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2010). Resolución 64/292: El derecho humano al agua y al saneamiento. Naciones Unidas.
- Orden, S., Macías, F., Cánovas, C. R., Nieto, J. M., Pérez-López, R., & Ayora, C. (2021). Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration. *Journal of environmental management*, 280, 111699.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Lead poisoning and health. WHO Fact Sheets.
- Ospina Betancur, M. (2013). Problemática jurídica y ambiental de minas abandonadas en Colombia. **Revista Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 43*(119), 275–301.
- Otunola, B. O., Alaba, P. A., & Okonkwo, J. O. (2023). Improving capacity for phytoremediation of vetiver grass through clay mineral amendments. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 12345–12360. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26083-5>
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC. U.S. Geological Survey Techniques and Methods.
- Pocan, L., Restrepo, G. M., & Arroyave, D. (2025). Evaluación económica y ambiental comparativa de tratamientos activos y pasivos para drenajes ácidos de mina en contextos latinoamericanos. *Revista Latinoamericana de Minería Sostenible*, 12(1), 45–63.
- Pérez-Flores, M., et al. (2019). Assessment of stability in pillar and chamber mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9), 3121–3138.
- Pérez-López, R., Macías, F., & Ayora, C. (2021). Mechanisms of neutralization of acid mine drainage by carbonate rocks: Laboratory and field assessment. *Applied Geochemistry*, 132, 105007.

- Rakotonimaro, T. V., Neculita, C. M., Bussière, B., Genty, T., & Zagury, G. J. (2018). Performance assessment of laboratory and field-scale multi-step passive treatment of iron-rich acid mine drainage for design improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(18), 17575-17589.
- Ramos-Perez, D., Alcántara-Hernández, R. J., Romero, F. M., & González-Chávez, J. L. (2022). Changes in the prokaryotic diversity in response to hydrochemical variations during an acid mine drainage passive treatment. *Science of The Total Environment*, 842, 156629.
- Rawls, J. (1999). *A theory of justice* (Rev. ed.). Harvard University Press. (Original work published 1971)
- Retka, J., Rzepa, G., Bajda, T., & Drewniak, L. (2020). The use of mining waste materials for the treatment of acid and alkaline mine wastewater. **Minerals*, 10*(12), 1061.
- Rezaie, B., & Anderson, A. (2020). Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. *Science of The Total Environment*, 717, 137211.
- Rizos, V., Behrens, A., Kafyeke, T., Hirschnitz-Garbers, M., & Ioannou, A. (2016). Implementation of circular economy business models by SMEs: Barriers and enablers. **CEPS Working Document 2016/27**.
- Rodríguez-Galán, M., Baena-Moreno, F. M., Vázquez, S., Arroyo-Torralvo, F., Vilches, L. F., & Zhang, Z. (2019). Remediation of acid mine drainage. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1529-1538.
- Ruehl, M. D., & Hiibel, S. R. (2020). Evaluation of organic carbon and microbial inoculum for bioremediation of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 157, 106554.
- Sachs, J. D. (2015). *The age of sustainable development*. Columbia University Press.
- Santos Jallath, J. E., Romero, F. M., Iturbe Argüelles, R., Cervantes Macedo, A., & Goslinga Arenas, J. (2018). Acid drainage neutralization and trace metals removal by a two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico. *Environmental earth sciences*, 77(3), 86.
- Schwarz, A., Nancuqueo, I., Gaete, M. A., Muñoz, D., Sanhueza, P., Torregrosa, M., & Aybar, M. (2020). Evaluation of dispersed alkaline substrate and diffusive exchange system technologies for the passive treatment of copper mining acid drainage. *Water*, 12(3), 854.
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). **Atlas Geoquímico de Colombia**. SGC.
- Simeonidis, K., Mourdikoudis, S., Kaprara, E., Mitrakas, M., & Polavarapu, L. (2016). Inorganic engineered nanoparticles in drinking water treatment: a critical review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(1), 43-70.
- Skousen, J. (2017). Overview of passive and active treatment of acid mine drainage. **Mine Water and the Environment*, 36 (2), 133–153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
- Skousen, J. G. (2017). Overview of passive and active treatment of acid mine drainage. **Mine Water and the Environment*, 36*(2), 133–153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>

- Skousen, J., Zipper, C. E., Rose, A., Ziemkiewicz, P. F., Nairn, R., McDonald, L. M., & Kleinmann, R. L. (2017). Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, 36(1), 133–153.
- Smedley, P.L., & Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517–568.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (2012). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Tiwary, R. K., & Dhar, B. B. (2022). Subsurface mining and acid mine drainage in tropical regions: Hydrogeological implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 585.
- Torres, E., Lozano, A., Macías, F., Gomez-Arias, A., Castillo, J., & Ayora, C. (2018). Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems. *Journal of cleaner production*, 182, 114-123.
- Torres, E., Lozano, A., Macías, F., Gómez-Arias, A., Castillo, J., & Ayora, C. (2018). Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems. *Journal of Cleaner Production*, 182, 114–123.
- Turingan, C. O. A., Singson, J. M., & Chen, A. (2020). Evaluation of efficiencies of locally available neutralizing agents for passive treatment of acid mine drainage. **Minerals*, 10*(10), 845.
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2021). **Mine Tailings Storage: Safety, Environmental and Social Practices**. United Nations Environment Programme.
- UNESCO. (2017). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- UNICEF & Organización Mundial de la Salud. (2021). *The Toxic Truth: Children's Exposure to Lead Pollution*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Data Quality Assessment: A Reviewer's Guide (EPA QA/G-9R)*. Office of Environmental Information, Washington, DC.
- Disponible en: <https://www.epa.gov/quality/data-quality-assessment-guidance-documents>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2001). Method 200.7 trace elements in water, solids, and biosolids by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. Epa.gov. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_200-7_rev_5_2001.pdf
- Standard Methods Committee of the American Public Health Association (2023). *Metals in Water and Wastewater: 3030 Preliminary Treatment of Samples*. In: Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington, DC: APHA, pp. 193-200.
- World Health Organization (WHO). (2021). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

-
- World Health Organization. (2021). Arsenic in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines.
- World Health Organization. (2021). Cadmium toxicity and human health. WHO Environmental Health Criteria.
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- World Health Organization. (2021). Manganese in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines.
- World Health Organization. (2021). Mercury exposure and health impacts. WHO Fact Sheets.
- Yang, Y., Li, B., Li, T., Liu, P., Zhang, B., & Che, L. (2023). A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104213. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104213>
- Younger, P. L. (2023). *Mine water: Hydrology, pollution, remediation* (2nd ed.). Springer.
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). **Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation**. Kluwer Academic Publishers.

Anexos

Anexo 1. Explotación subterránea, método de cámaras y pilares, operaciones unitarias y cierre de mina

El presente documento sintetiza los aspectos técnicos, operativos y ambientales asociados con la minería subterránea, centrándose en el método de cámaras y pilares, las operaciones unitarias características de este tipo de explotación y las estrategias de cierre progresivo y final de minas subterráneas, de acuerdo con la Guía Minero Ambiental de Explotación del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio del Medio Ambiente (ANM, 2023). Este análisis busca integrar criterios técnicos y de sostenibilidad, contribuyendo a una gestión responsable del recurso mineral y del territorio.

Explotación subterránea

La minería subterránea se aplica cuando las condiciones geológicas del depósito no permiten la explotación a cielo abierto. Implica la extracción de mineral a través de túneles y galerías que conectan el yacimiento con la superficie, con el objetivo de reducir la remoción de material estéril y minimizar el impacto ambiental. Este tipo de explotación requiere control de estabilidad, ventilación, drenaje y monitoreo continuo de la seguridad estructural del macizo rocoso.

Método de cámaras y pilares

El método de cámaras y pilares es uno de los sistemas subterráneos más empleados en Colombia. Consiste en dejar pilares de mineral sin extraer para sostener el techo de las galerías, mientras se excavan cámaras alternas para la recuperación del mineral. Las dimensiones de cámaras y pilares dependen de la resistencia de la roca y de las condiciones geotécnicas del yacimiento. Este método ofrece estabilidad estructural, buena ventilación y control de drenaje, aunque la recuperación total del mineral suele ser inferior al 80 % debido a los pilares permanentes.

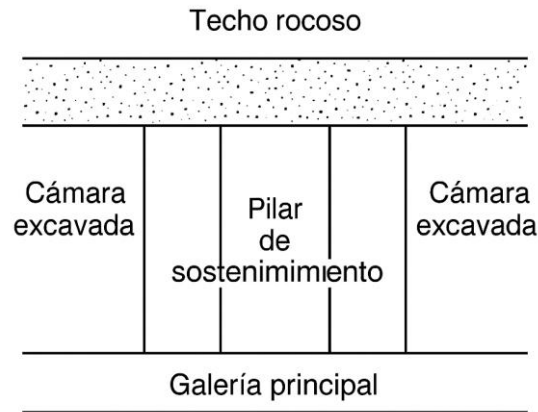


Figura 1. Esquema conceptual del método de cámaras y pilares en minería subterránea

Figura 9. Esquema conceptual del método de cámaras y pilares en minería subterránea.

Operaciones unitarias en minería subterránea

Las principales operaciones unitarias comprenden: (a) arranque del mineral mediante perforación, voladura o corte mecánico; (b) cargue y transporte con palas, vagonetas o bandas; (c) entibación o sostenimiento con madera, acero o concreto; (d) ventilación y drenaje para mantener condiciones seguras; y (e) transporte externo y almacenamiento controlado del material extraído. Cada una de estas fases busca mantener la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del proceso minero.

Cierre y abandono de minas subterráneas

El cierre de una mina subterránea debe planificarse desde la etapa de operación, asegurando la estabilidad física, química y social del área intervenida. Entre las medidas más relevantes se encuentran: relleno de túneles, sellado de entradas, control del drenaje ácido, reforestación y adecuación del terreno para usos sostenibles. El monitoreo post-cierre incluye la evaluación de la calidad del agua, la estabilidad estructural y el cumplimiento de los objetivos ambientales y de seguridad establecidos en el Plan de Cierre.

Conclusión general

La minería subterránea mediante el método de cámaras y pilares representa una alternativa eficiente y segura cuando se aplican controles técnicos y de sostenimiento adecuados. El cierre planificado desde las etapas iniciales garantiza la reducción de impactos, la estabilidad geoquímica

y la recuperación sostenible del territorio minero. Este enfoque contribuye a la consolidación de una minería responsable, alineada con los principios de la economía circular y la protección ambiental.

