

Evaluación de aditivos químicos que inhiben la formación de drenajes ácidos de mina en
relaves de concentración gravimétrica de oro

Kenny Marcell Carreño Joya y Mario Andrés Castellanos Calderón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencias de la tierra

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, a nuestras familias y a todos aquellos que creyeron en nosotros. Este logro es el resultado de la dedicación conjunta y el deseo de superación ante situaciones complicadas durante nuestras vidas.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a nuestro director de tesis, el profesor Pedro Luis Delvasto Angarita, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Su experiencia ha sido fundamental para la culminación de este trabajo.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud a las escuelas de Geología e Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, de la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los recursos necesarios y por sus valiosos aportes técnicos.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias y amigos por su paciencia, comprensión y apoyo emocional incondicional durante estos años de estudio.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1 Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 Marco Teórico.....	17
2.1 Relaves generados en el procesamiento de menas auríferas.....	17
2.2 Asociaciones minerales del oro	18
2.3 Métodos gravimétricos para la minería y extracción de oro.....	18
2.3.1 Mesas de concentración	20
2.4 Orígenes de los drenajes ácidos de mina	21
2.4.1 Formación de los drenajes ácidos de mina.....	21
2.5 Tratamiento de drenajes ácidos.....	24
2.5.1 Tratamientos de inhibición de las superficies:	24
2.5.2 Tratamientos biológicos:.....	25
2.6 Pruebas cinéticas:.....	26
2.7 Aditivos bioquímicos	27
2.7.1 SM6: Extracto líquido de <i>Ascophyllum nodosum</i>	27
2.7.2 Black Diamond: Extracto producto de la oxidación de lignito (Leonardita).....	28
3 Metodología	30
3.1 Revisión bibliográfica, planteamiento del problema y estructuración de la investigación.....	30
3.2 Obtención de material de mina y fabricación de los relaves gravimétricos	31
3.2.1 Preparación del material de mina.....	31

3.2.2	Obtención de material concentrado de sulfuros metálicos.....	32
3.3	Fabricación de relave sintético.....	34
3.3.1	Oxidación de material concentrado.....	34
3.3.2	Construcción del relave sintético.....	36
3.4	Construcción de las columnas de lixiviación.....	37
3.4.1	Obtención de materiales de acuerdo con el Modelo ASTM para la realización de columnas de lixiviación.....	37
3.4.2	Armado de las columnas de lixiviación.....	39
3.4.3	Oxidación de los cubos de pirita testigo que se insertaron en las columnas.....	42
3.5	Muestreo de las columnas para análisis fisicoquímicos de laboratorio.....	45
3.5.1	Análisis de SEM, DRX Y FRX.....	45
3.5.2	Análisis por microscopía óptica.....	46
3.6	Búsqueda de aditivos químicos que inhiban la acidificación.....	46
3.6.1	Revisión bibliográfica sobre antecedentes de aditivos químicos o biológicos utilizados que inhiban la generación de drenajes ácidos.....	46
3.7	Cálculo de volumen de riego a aplicar.....	46
3.8	Saturación previa al comienzo de los riegos.....	47
3.9	Adición de compuestos orgánicos que servirán como remediadores de los relaves ácidos de minería.....	48
3.10	Riegos.....	50
3.11	Determinación de hierro soluble remanente en los sólidos de la columna al finalizar el experimento.....	51
4	Resultados.....	54

4.1	Caracterización de los materiales de partida.....	54
4.1.1	Concentrado sulfuros no oxidados.....	54
4.1.2	Concentrado sulfuros oxidados.....	55
4.1.3	Relave sintético oxidado.....	56
4.1.4	Relave sintético no oxidado.....	57
4.2	Análisis de difracción y fluorescencia de rayos x.....	57
4.2.1	Relave sintético no oxidado.....	57
4.2.2	Relave sintético oxidado.....	59
4.3	Comportamiento de las columnas.....	61
4.3.1	Características fisicoquímicas de los lixiviados.....	62
4.3.2	Gráficos pH/Conductividad vs Semanas.....	64
4.3.3	Concentración de hierro en los lixiviados.....	68
4.4	Análisis de modificación superficial de los testigos de pirita.....	70
4.4.1	Testigo Columna Control no oxidada.....	70
4.4.2	Testigo Columna SM6 no oxidada.....	71
4.4.3	Testigo Columna Black Diamond no oxidada.....	73
4.4.4	Testigo Columna Mezcla no oxidada.....	74
4.4.5	Testigo Columna Control Oxidada.....	75
4.4.6	Testigo Columna Black Diamond oxidada.....	77
4.4.7	Testigo Columna SM6 oxidada.....	78
4.5	Capacidad de intercambio de hierro del relave post meteorización.....	79
5	Discusión.....	80
6	Conclusiones.....	87

Referencias Bibliográficas 89

Lista de figuras

Figura 1 <i>Partes de una mesa concentradora</i>	21
Figura 2 <i>Fases de formación de drenajes ácidos de minería</i>	24
Figura 3 <i>Dispositivo de extracción por percolación en columna</i>	27
Figura 4 <i>Diagrama de flujo de la metodología experimental del trabajo de investigación</i> ...	30
Figura 5 <i>Material suministrado por la UIS</i>	31
Figura 6 <i>Molino de bolas</i>	32
Figura 7 <i>Mesa concentradora Wilfley</i>	33
Figura 8 <i>Secado del material en horno convector</i>	33
Figura 9 <i>Proceso de oxidación de material concentrado con cloruro férrico</i>	35
Figura 10 <i>Material oxidado después del proceso de secado</i>	35
Figura 11 <i>Soporte para siete columnas de lixiviación</i>	37
Figura 12 <i>Tubo de PVC con 10cm de diámetro interno y 40 cm de altura</i>	38
Figura 13 <i>Tapa/desagüe para recolectar el agua</i>	38
Figura 14 <i>Malla de polietilena</i>	39
Figura 15 <i>Tejido de fibra de vidrio</i>	39
Figura 16 <i>Sistema de goteo continuo</i>	40
Figura 17 <i>Columnas de lixiviación instaladas</i>	41
Figura 18 <i>Esquema de la columna de lixiviación</i>	42
Figura 19 <i>Proceso de oxidación de testigos de pirita</i>	43
Figura 20 <i>Testigo de pirita sin oxidar</i>	44
Figura 21 <i>Testigo de pirita oxidado</i>	44
Figura 22 <i>Molino de anillos</i>	45

Figura 23	<i>Columnas de lixiviación con sistema de micro goteo</i>	51
Figura 24	<i>Mezclas en agitación para extracción de hierro presente en el relave</i>	52
Figura 25	<i>Proceso de adición de HCl a la solución</i>	53
Figura 26	<i>Imagen SEM y análisis cuantitativo del concentrado de sulfuros no oxidados</i>	54
Figura 27	<i>Imagen SEM y análisis cuantitativo del concentrado de sulfuros oxidados</i>	55
Figura 28	<i>Imagen SEM y análisis cuantitativo del relave sintético oxidado</i>	56
Figura 29	<i>Imagen SEM y análisis cuantitativo del relave sintético no oxidado</i>	57
Figura 30	<i>Difractograma del relave sintético no oxidado</i>	58
Figura 31	<i>Difractograma del relave oxidado</i>	60
Figura 32	<i>Gráfico Columnas no oxidadas pH vs Semanas</i>	65
Figura 33	<i>Gráfico Columnas oxidadas pH vs Semanas</i>	66
Figura 34	<i>Gráfico Columnas no oxidadas Conductividad vs Semanas</i>	67
Figura 35	<i>Gráfico Columnas oxidadas Conductividad vs Semanas</i>	68
Figura 36	<i>Resultados de los análisis de hierro soluble de los lixiviados recopilados en puntos clave del experimento</i>	69
Figura 37	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna control no oxidada</i>	70
Figura 38	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna SM6 no oxidada</i>	71
Figura 39	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la Black Diamond no oxidada</i>	73
Figura 40	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna mezcla no oxidada</i>	74
Figura 41	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna control oxidada</i>	75
Figura 42	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna Black Diamond oxidada</i>	77
Figura 43	<i>Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna SM6 oxidada</i>	78

Figura 44 *Cantidad de hierro en mg/kg que intercambia el relave en solución.....* 79

Lista de tablas

Tabla 1 Asociación mineral con oro y sus procesos de obtención	18
Tabla 2 Promedios de precipitaciones desde 1985-2025	47
Tabla 3 Tratamientos realizados en cada columna de lixiviación	49
Tabla 4 Resultados FRX del relave sintético no oxidado	59
Tabla 5 Resultados FRX del relave sintético oxidado	61
Tabla 6 Información de los riegos	62
Tabla 7 Datos de volumen, Ph y conductividad eléctrica de los lixiviados	63

Lista de apéndices

Nota: Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.

- A.** Figuras ilustrativas de las secciones de lámina delgada en microscopio del material no oxidado y oxidado, referenciadas con escala.

Resumen

Título: Evaluación de aditivos químicos que inhiben la formación de drenajes ácidos de mina en relaves de concentración gravimétrica de oro *

Autor: Kenny Marcell Carreño Joya, Mario Andrés Castellanos Calderón **

Palabras Clave: Lixiviado, drenaje ácido de minería (DAM), inhibición, bioestimulantes, aditivos.

Descripción: Esta investigación evaluó el comportamiento de meteorización de relaves mineros sintéticos provenientes de Vetas, Santander, obtenidos mediante molienda y separación gravimétrica. El objetivo principal fue mitigar la formación de Drenajes Ácidos de Mina (DAM) mediante la aplicación de dos bioestimulantes comerciales ricos en carbono orgánico, Black Diamond y SM6, los cuales actúan como inhibidores de barrera para evitar la oxidación de la pirita. Para ello, se utilizaron columnas de lixiviación sometidas a ciclos de riego durante 13 semanas, simulando los regímenes de precipitación de la región. El estudio incluyó el análisis de los lixiviados y la caracterización mineralógica del material mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y determinación de hierro disuelto.

Los resultados demostraron que tanto Black Diamond como SM6 fueron efectivos en la reducción de la oxidación de la pirita y en la estabilización del pH. No obstante, se observó que los periodos secos simulados provocaron un repunte en la acidez, confirmando que la aireación y la humedad residual reactivan el proceso oxidativo. Asimismo, se identificó un impacto negativo en otros parámetros de calidad del agua: el Black Diamond incrementó significativamente la carga de hierro, mientras que el extracto de algas (SM6) elevó la salinidad y la conductividad eléctrica de los lixiviados.

*Evaluación de aditivos químicos que inhiben la formación de drenajes ácidos de mina en relaves de concentración gravimétrica de oro.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Evaluation of chemical additives that inhibit the formation of acid mine drainage in gold gravity concentration tailings *

Author: Kenny Marcell Carreño Joya, Mario Andrés Castellanos Calderón **

Key Words: Leachate, acid mine drainage (AMD), inhibition, biostimulants, additives.

Description: This research evaluated the weathering behavior of synthetic mine tailings from Vetás, Santander, obtained through grinding and gravimetric separation. The primary objective was to mitigate the formation of Acid Mine Drainage (AMD) by applying two commercial biostimulants rich in organic carbon, Black Diamond and SM6, which act as barrier inhibitors to prevent pyrite oxidation. To simulate regional precipitation regimes, leaching columns were subjected to irrigation cycles over a period of 13 weeks. The study involved leachate analysis and mineralogical characterization of the material using Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF), and the determination of dissolved iron levels.

The results demonstrated that both Black Diamond and SM6 were effective in reducing pyrite oxidation and stabilizing pH levels. However, simulated dry periods led to an increase in acidity, confirming that aeration and residual moisture reactivate the oxidative process. Furthermore, negative impacts on other water quality parameters were identified: Black Diamond significantly increased the iron load, while the seaweed extract (SM6) raised the salinity and electrical conductivity of the leachates.

* Evaluation of chemical additives that inhibit the formation of acid mine drainage in gold gravity concentration tailings.

** School of Geology, Faculty of Physicochemical Engineering. Advisor: Pedro Luis Delvasto Angarita, PhD in Materials Science and Technology.

Introducción

La minería gravimétrica de oro es un método de separación del mineral que, mediante movimientos horizontales y verticales en una mesa gravimétrica, también conocida como mesa de Wilfley, permite la separación de los granos según su tamaño y densidad (Wills & Finch, 2015). De esta manera, es posible precipitar el mineral sin producir contaminación por metales pesados en el proceso, como ocurre en la extracción con mercurio. Sin embargo, este tipo de minería conlleva otro problema medioambiental: la producción de relaves ácidos de mina, que generan la principal fuente de contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Esta contaminación puede perdurar durante décadas y es responsable de la mayoría de los problemas minero-ambientales en la industria. (Carrasco, 2016).

En la actualidad, grandes cantidades de materiales geológicos secundarios que contienen sulfuros metálicos se generan como consecuencia de operaciones de minería. Los mismos, se almacenan, bajo la figura de botaderos de rocas estériles o relaves, que, en condiciones naturales, pueden oxidarse fácilmente, iniciando un proceso de formación drenajes ácidos (DAM). (Pamo et al., 2002).

En este contexto, la disminución o neutralización de los relaves ácidos mineros se presenta como posibilidad para mitigar el impacto medioambiental en la minería, debido a que los drenajes ácidos de mina, se pueden seguir generando incluso años después al cierre de la mina, se plantea entonces un método de prevención que puede disminuir la formación de los DAM, para ello se recurre al empleo de aditivos químicos comerciales de origen natural, ricos en carbono orgánico soluble, que se espera actúen como barreras que impidan o mitiguen la oxidación de los minerales sulfurosos presentes en los relaves.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la inhibición química de la oxidación de los minerales sulfurosos contenidos en un relave de concentración gravimétrica de oro empleando columnas de lixiviación.

1.2 Objetivos Específicos

- Obtener a escala de laboratorio un relave de concentración gravimétrica de minerales auríferos de procedencia nacional.
- Caracterizar el relave obtenido e identificar las fases generadoras de drenajes ácidos y sus características geoquímicas.
- Evaluar en columnas de lixiviación, la capacidad inhibitoria del drenaje ácido de mina empleando agentes químicos comerciales y naturales.

2 Marco Teórico

2.1 Relaves generados en el procesamiento de menas auríferas

Independientemente del método utilizado, la minería se basa en extraer y procesar minerales. Una vez finalizado el proceso de beneficio y extraídos los metales de interés, se generan desechos compuestos por partículas de diversos tamaños (que van desde limos y arcillas hasta arenas finas). Este residuo sólido resultante se conoce técnicamente como relaves o colas (Beltrán-Rodríguez et al., 2018).

Los relaves están catalogados como pasivos ambientes mineros, que representan el riesgo más crítico para el entorno, debido a su capacidad de generar diversas alteraciones. Entre sus principales efectos destacan la contaminación de los cuerpos de agua (superficiales y freáticos) y de los suelos, la dispersión de metales pesados y el deterioro del paisaje (Romero y Flores, 2010)

la mayoría de los residuos mineros se han gestionado mediante presas de relaves. Aunque estas estructuras pueden ser estables si se operan correctamente, los fallos catastróficos recientes han puesto en evidencia los riesgos extremos que conllevan: pérdidas humanas, desastres ecológicos y graves crisis económicas y sociales. Estos colapsos suelen ser el resultado de fallas acumuladas en todas las etapas, desde el diseño inicial hasta el cierre definitivo (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

Debido a esta problemática, en la actualidad la industria minera a nivel mundial está optando por disponer los relaves en depósitos, estructuras que a comparación de las presas de relaves no requieren tanta infraestructura y área, dado que contienen material con menor grado de humedad, con comportamientos más relacionados a materiales sólidos y no a fluidos como los relaves convencionales almacenados en las presas, lo que representa minimización considerable del riesgo (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

2.2 Asociaciones minerales del oro

Según Palyanova et al. (2019), el oro se encuentra principalmente asociado a minerales de tipo sulfuro como lo son la pirita, la galena, la arsenopirita, la estibina, la pirrotina y la calcopirita, sin embargo, el oro también se puede asociar con minerales sobre la superficie como lo son óxidos de hierro y manganeso, algunos carbonatos y silicatos. Además de esto, según Galloso Carrasco et al. (2008) el oro nativo se puede encontrar mezclado con material suelto y posteriormente acomodado por acción hidráulica, comúnmente llamado placeres, dónde se encuentra a su vez, minerales de hierro, titanio y estaño.

Tabla 1

Asociación mineral con oro y sus procesos de obtención

Asociación Mineral con Oro	Proceso de obtención del oro
Sulfuros de cobre	SART (Sulfuración, acidificación, recirculación y espesamiento)
Oro nativo	Gravimetría - Cianuración
Sulfuros de cobre, plomo y zinc	Flotación - tostación - fundición
Teluros	Lixiviación HCl + Fe ³⁺
Antimonio	Lixiviación NaCl + HCl + Fe ³⁺ Preaireación con Pb NO ₃ Cianuración
Arsénico	Oxidación biológica - Cianuración
Carbón	Oxidación con Cl - Cianuración
Pirrotina	Aireación - Cianuración
Pirita	Oxidación alta temperatura - Cianuración
Sulfuros consumidores de CN-	Thiourea
Refractarios carbonosos de baja ley	Lixiviación en pilas - Lixiviación Thiosulfato

Nota. Tomado y editado de Ortiz et al. (2009).

2.3 Métodos gravimétricos para la minería y extracción de oro

La definición de concentración gravimétrica se concibe como una separación de minerales basada en la diferencia de densidades y gravedades específicas entre la especie de interés y la ganga (Elorza, 2020).

Los métodos de separación gravimétrica se utilizan para tratar gran variedad de materiales, desde sulfuros de metales pesados hasta carbón, generalmente con tamaños de partícula inferiores a 50 μm , aprovecha que las partículas más densas tienden a sedimentar o acumularse más rápidamente que las de menor densidad cuando están en un medio fluido o en suspensión. De esta manera, es posible separar minerales valiosos, como el oro, que teniendo en cuenta su alta densidad (19,3 g/cm^3), ha sido uno de los métodos tradicionales más utilizado para su beneficio (Elorza, 2020).

Para una eficiente separación, según Wills y Finch (2015), es necesario que entre los minerales a separar exista una marcada diferencia entre sus gravedades específicas. El criterio de concentración (Ec. 1) permite obtener lo eficiente de la separación.

$$\text{Criterio de concentracion} = \frac{(D_H - D_f)}{(D_L - D_f)} \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde D_H se refiere a la gravedad específica del mineral pesado, D_L es la gravedad específica del mineral ligero y por último D_f es la gravedad específica del fluido, si el cociente resulta ser un número mayor a 2,5, ya sea positivo o negativo, significa que la separación por gravedad resultará relativamente fácil y la eficiencia de esta separación disminuirá a medida que disminuye el valor del cociente. (Wills & Finch, 2015).

Otro factor para considerar sería el tamaño de las partículas, según Elorza, (2020), las de mayor tamaño se verán más afectadas y podrán moverse, realizando un proceso más efectivo, contrario a esto, las partículas con menor tamaño responden mal a los procesos gravitacionales, teniendo en cuenta que se requiere que el movimiento relativo de las partículas dependa de la gravedad específica de cada mineral.

La alimentación o mezcla de partículas minerales que será procesada, según Elorza, (2020), debe tener un proceso de preparación en los cuales se debe tener en cuenta:

- a. La mezcla se debe adecuar para obtener la mayor liberación.
- b. La mezcla debe pasar un proceso de molienda en molinos de rodillos.
- c. La presencia de lamas (partículas ultrafinas) puede afectar la viscosidad de la pulpa y reducir la agudeza de la separación.
- d. Se debe retirar las partículas menores a 10 micras.
- e. Mantener el porcentaje de sólidos suspendidos en la pulpa (mezcla de las partículas sólidas con agua).

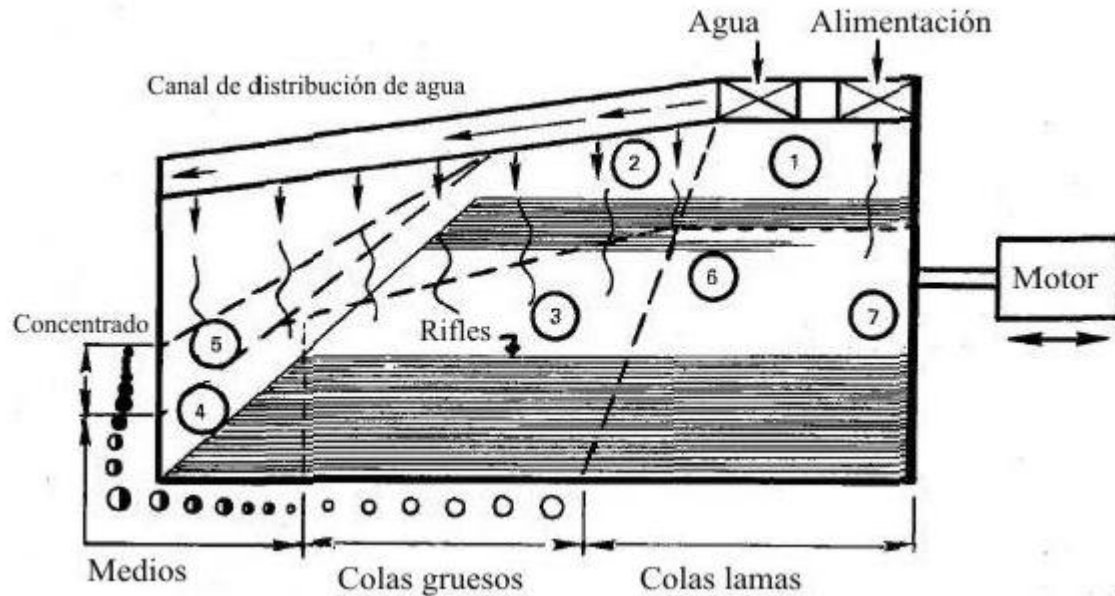
2.3.1 Mesas de concentración

En las mesas de concentración se utiliza una película de agua fluyendo sobre una superficie plana inclinada y un desplazamiento cíclico perpendicular al flujo del agua, aquí ocurre una diferencia de velocidades en el agua, donde será mínima en la parte baja y máxima en la interfase aire-agua. Al momento de introducir el material en la película de agua, las partículas más finas se moverán a mayor velocidad y se localizarán en la parte superior de la película, contrario a las partículas más gruesas que se moverán más lentamente y terminarán en la zona de descarga (Gupta & Yan, 2006).

El flujo de agua debe introducirse por una lateral de la mesa formando una película uniforme sobre toda la superficie, la alimentación introducida en las mesas concentradoras debe tener un 25% de sólidos en peso, la pendiente debe ajustarse de manera que los materiales más pesados se depositen en el extremo correspondiente (Elorza, 2020).

Figura 1

Partes de una mesa de concentración.



Nota: Tomado de Elorza, (2020).

2.4 Orígenes de los drenajes ácidos de mina

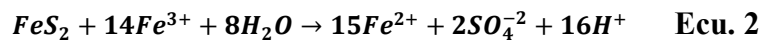
Los drenajes ácidos de mina (DAM) son aguas formadas por un proceso de oxidación de minerales sulfurados, que suelen quedar expuestos como resultado de los procesos de exploración minera; uno de los minerales principales causantes de los DAM es la pirita, que, junto con otros procesos químicos, físicos y biológicos, constituyen una de las preocupaciones ambientales más importantes en las operaciones minera (Aduvire, 2006).

2.4.1 Formación de los drenajes ácidos de mina

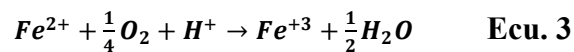
Las principales características de los DAM es su elevada acidez, la presencia de metales tóxicos disueltos y de sulfatos como lo son Hg, Cd, As, Sb, Cu, Fe y Zn. Estos drenajes se pueden catalogar en dos tipos, los drenajes ácidos de mina (DAM), los cuales estarán asociados a la

reacción de oxidación de sulfuros en el interior de operaciones mineras y los drenajes ácidos de rocas (DAR), que están asociados a los sitios de almacenamiento de residuos mineros que no son químicamente estables, sin embargo, en este trabajo nos referiremos a ambos como DAM (Zamora Echenique & Meza Duman, 2022).

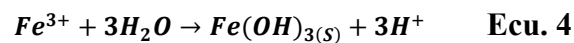
La formación de los drenajes ácidos se da principalmente por la oxidación química de la pirita, así como se muestra en la ecuación 2, a pH neutros la oxidación de la pirita es relativamente lenta, cuando el pH supera los 4.5, la reacción se vuelve más eficiente, también debe tenerse en cuenta que el oxígeno es el elemento que controla la velocidad de la reacción química (Zamora Echenique & Meza Duman, 2022).



Cuando el pH llega a valores inferiores a 4.5, el proceso dominante será la oxidación por el hierro férrico. Es importante contextualizar que algunas bacterias como la *Acidithiobacillus ferrooxidans*, siempre que el pH del ambiente sea apto para su supervivencia, actuarán como catalizadoras de las reacciones. Esta catálisis biológica aumentará la velocidad de la reacción (Vásquez Ochoa, 2016).

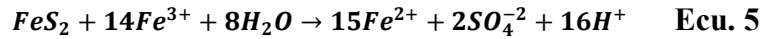


Dependiendo del pH del entorno donde ocurre la oxidación, el hierro férrico puede precipitar en forma de hidróxido (Zamora Echenique & Meza Duman, 2022).



Si el pH se encuentra por encima de 3.5, el hierro férrico tiende a precipitarse como hidróxido férrico (Fe^{3+}), el cual es el causante del precipitado rojo que se observa en la mayoría

de las minas generadoras de drenajes ácidos. El hierro férrico, actúa como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos (Zamora Echenique & Meza Duman, 2022).

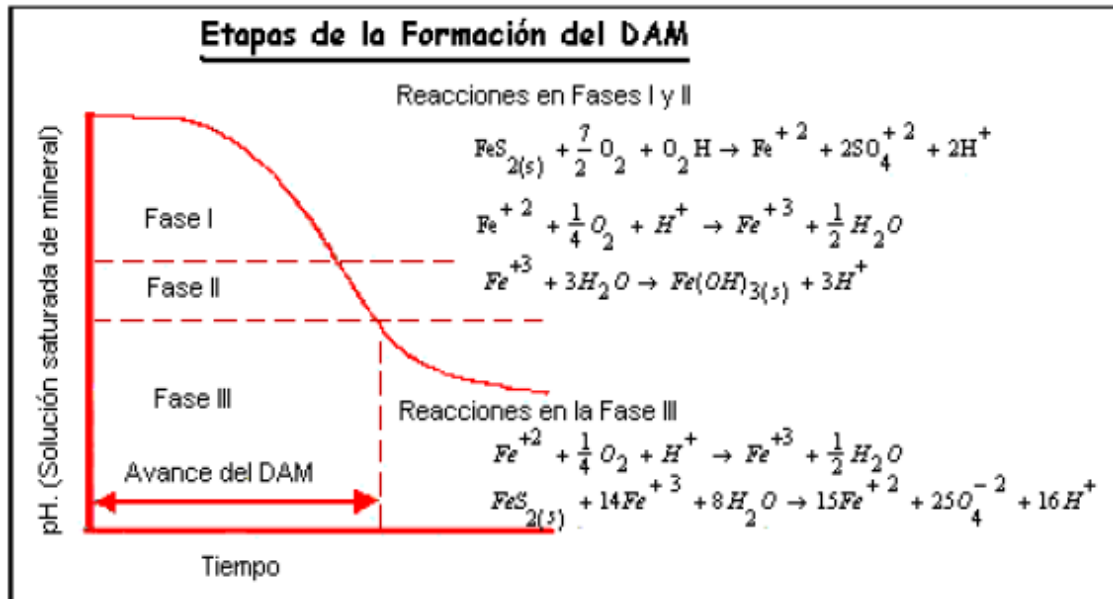


Según Aduvire, (2006), la formación de drenajes ácidos se puede dividir en 3 etapas, las cuales son:

1ª Fase: Se oxidan los minerales sulfurosos, los cuales empezarán el proceso de liberación de hierro ferroso que en condiciones neutras se oxida y se transforma en hierro férrico que posteriormente se precipitará como hidróxido aportando acidez al medio. En esta etapa, los procesos se desarrollan de forma lenta y normalmente, la alcalinidad del medio es suficiente para neutralizar la acidez (Aduvire, 2006).

2ª Fase: En esta etapa se consume la alcalinidad del medio y el pH disminuye (4.5 a 2.5), en esta reacción se produce sulfato ferroso que posteriormente se oxidará a sulfato férrico, que al entrar en contacto con el agua, generan el ácido sulfúrico e hidróxido férrico (Aduvire, 2006).

3ª Fase: En el momento que el pH baja hasta 3, los iones férricos son afectados por las reacciones de oxido-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro a sulfato y el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros, volviendo el ambiente más ácido (Aduvire, 2006).

Figura 2*Fases de formación de drenajes ácidos de minería*

Nota: Tomado de Zamora Echenique y Meza Duman (2022).

2.5 Tratamiento de drenajes ácidos

Existen diversos tratamientos para los drenajes ácidos de mina que parten de inhibir la oxidación de la pirita:

2.5.1 Tratamientos de inhibición de las superficies:

El método de inhibición superficial es una opción prometedora para prevenir el drenaje ácido de minas (DAM), que requiere encontrar una sustancia que se adhiera a la superficie de la pirita y que pueda aislar el oxígeno y el agua. Se han realizado numerosas investigaciones sobre el control de la oxidación de la pirita mediante la inhibición superficial, y existen diversos recubrimientos que pueden aplicarse a la superficie de la pirita con este método, incluyendo recubrimientos inorgánicos, representados por fosfato, silicato e hidróxido férrico. Los recubrimientos orgánicos están representados por lignina, ácido húmico, oleato de sodio, fosfolípidos y trietilentetramina (Huang et al. 2025).

El ácido húmico es una sustancia orgánica de molécula grande que se origina a partir de la descomposición química y biológica de materia vegetal y animal, así como de la actividad biológica de microorganismos. Técnicamente, se define como una mezcla compleja de biopolímeros que contiene diversos grupos funcionales oxigenados, tales como carboxilos, fenoles, hidroxilos, cetonas y quinonas. Estos grupos funcionales, especialmente el ácido carboxílico, permiten que el ácido húmico se una a los iones metálicos y afecte su movilidad, toxicidad y biodisponibilidad. Por ello, el ácido húmico se ha empleado como agente inhibitorio de barrera para suprimir la oxidación de la pirita (Liu et al., 2024).

2.5.2 Tratamientos biológicos:

Existen técnicas que aprovechan actividades biológicas para degradar compuestos químicos y así tratar la contaminación generada por los DAM, entre estas actividades se encuentran la biolixiviación, la bioadsorción, la bioacumulación y la oxidación y reducción biológicas (Rambabu et al., 2020); (Sanchez Rial & Ferreira Centeno, 2016).

La actividad de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que catalizan la oxidación del hierro, es un factor determinante en la producción de drenajes ácidos; sin embargo, se estima que la neutralización de estos microorganismos puede mitigar el proceso de acidificación hasta en un 50 %. Para lograr esta inhibición, se ha comprobado que el uso de ácidos orgánicos y surfactantes aniónicos resulta altamente efectivo como estrategia bactericida (Aduvire, 2006).

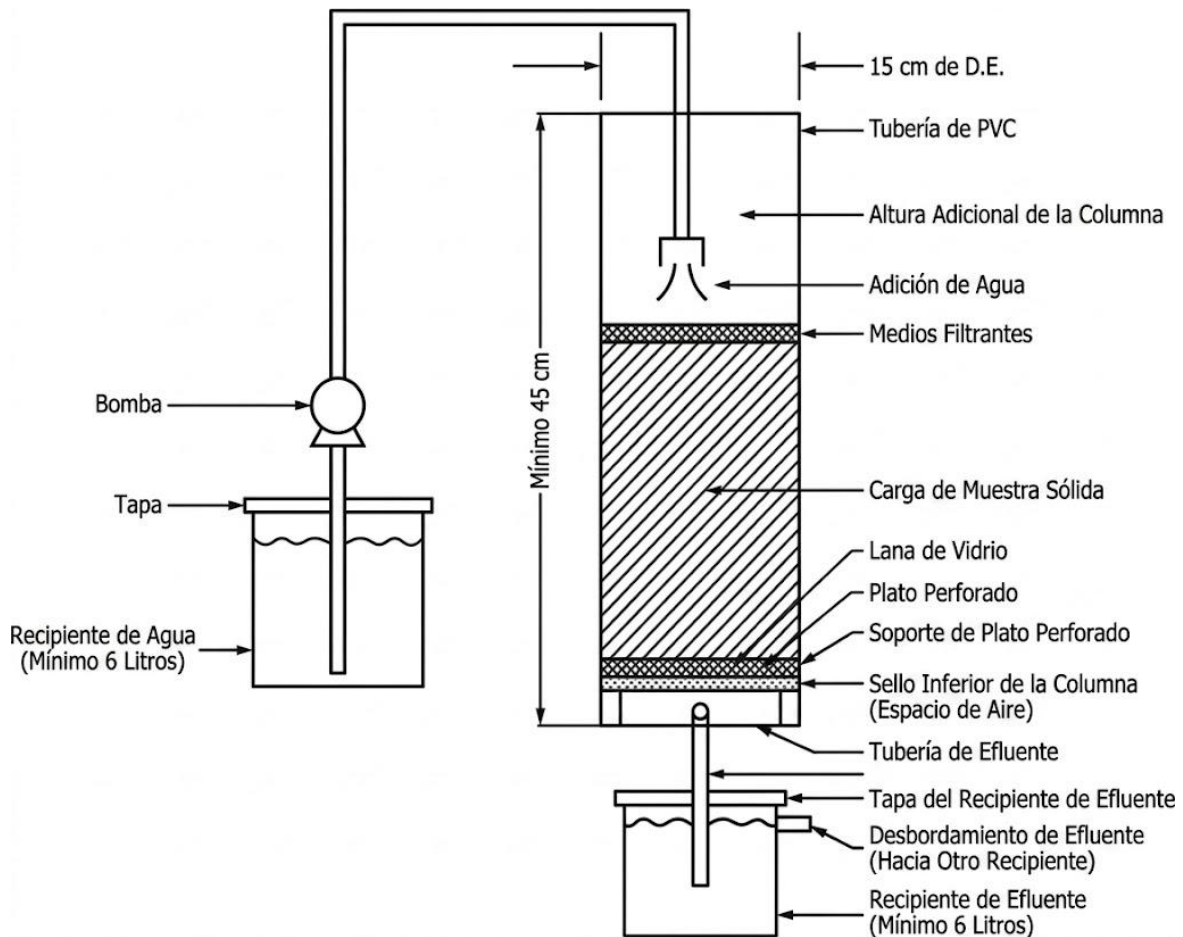
Aunque el uso de bactericidas resulta una estrategia atractiva de corto plazo, su efectividad tiene un corto plazo. Es fundamental considerar que estos agentes intervienen exclusivamente en la catálisis biológica, dejando intacta la oxidación química de los sulfuros. Por este motivo, se recomienda integrar siempre medidas complementarias que permitan neutralizar la acidez generada por vía abiótica, garantizando así un control integral de los efluentes (Aduvire, 2006).

2.6 Pruebas cinéticas:

Las pruebas de lixiviación en columnas parten principalmente de la ubicación del material de interés dentro de unos cilindros que someterán al material a un riego para simular la exposición a condiciones ambientales y lograr producir los DAM de manera controlada en laboratorio.

De acuerdo con la norma ASTM (2021), el ensayo de lixiviación se realiza en columnas de PVC de 15 cm de diámetro exterior y una altura sugerida de 45 cm, dimensiones diseñadas para albergar muestras de aproximadamente 5 kg.

Estructuralmente, la base de la columna debe estar sellada y contar con un plato perforado soportado sobre lana de vidrio para facilitar el drenaje. El montaje requiere dos contenedores herméticos de unos 6 litros para el almacenamiento del agua de alimentación y la recolección del lixiviado, evitando así, cualquier contaminación externa. El proceso operativo implica el suministro de agua desde la parte superior mediante una bomba dosificadora o un sistema de presión constante para saturar la muestra; posteriormente, el fluido percola a través del material, atraviesa el filtro de lana de vidrio y el plato perforado, y es conducido por un embudo hacia el recipiente final de muestreo (ASTM, 2021).

Figura 3*Dispositivo de extracción por percolación en columna*

Nota. Diseño del sistema de columna para la realización de la prueba de lixiviación. Tomado y editado de: ASTM, (2021).

2.7 Aditivos bioquímicos

2.7.1 SM6: Extracto líquido de *Ascophyllum nodosum*

SM-6 es un bioestimulante basado en el extracto de algas *Ascophyllum nodosum* obtenido únicamente mediante extracción por medio de métodos físicos como la extracción asistida por ultrasonidos, pulverización, filtración y liofilización para garantizar un extracto puro (Plymag, 2020).

Según un ensayo realizado por la Universidad de Alicante, el SM6 presenta una actividad citoquinética equivalente a 2000 ppm de kinetina (Colegio Oficial de Agrónomos de Levante [COIAL], 2018), demostrando que es un potente bioestimulante natural que se agrega al sustrato en factor de 1 a 4 litros de producto por hectárea con una concentración recomendada del 0,5 - 10%, que promueve la recuperación y proliferación de materia orgánica viva reestableciendo parámetros adecuados para diferentes tipos de cultivos (Plymag, 2023).

Según Plymag (2020), el principal contenido del producto está basado en citoquininas de tipo fito regulador natural, manitol y ácido algínico con la siguiente composición y características:

- Carbono orgánico: 13 % p/p.
- Carbono orgánico oxidable: 20 g/L.
- Materia orgánica: 23% p/p.
- Óxido de potasio: 40 g/L de K_2O .
- Ácido algínico: 6.0% p/p – 6.96% p/v.
- Manitol: 2.0% p/p – 2.32% p/v.
- pH: 5.1.
- Densidad: 1.15 g/mL.
- Conductividad eléctrica: 26.93 dS/m.

2.7.2 Black Diamond: Extracto producto de la oxidación de lignito (Leonardita)

El Black Diamond es una enmienda orgánica que se obtiene a través de la extracción de lignito altamente oxidado en minas de Turquía, conocido como Leonardita, que se caracteriza como un mineraloide. Provee un alto contenido de ácidos húmicos y fúlvicos. Promueve el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de materia orgánica viva y el cuidado del medio ambiente en la

remediación de suelos contaminados y su potencial para reducir la salinidad. (Narpes Colombia S.A.S., 2016).

La composición del producto Black Diamond en presentación líquido según Narpes Colombia S.A.S. (2016), es:

Carbono de extracto húmico total: 50 g/L.

Carbono de ácidos húmicos: 45 g/L.

Carbono de ácidos fúlvicos: 5 g/L.

Potasio soluble en agua: 68.5 g/L.

Sodio soluble en agua: 0.15 g/L.

Sólidos insolubles: 22.6 g/L.

pH: 8.43.

Densidad: 1.1 g/mL.

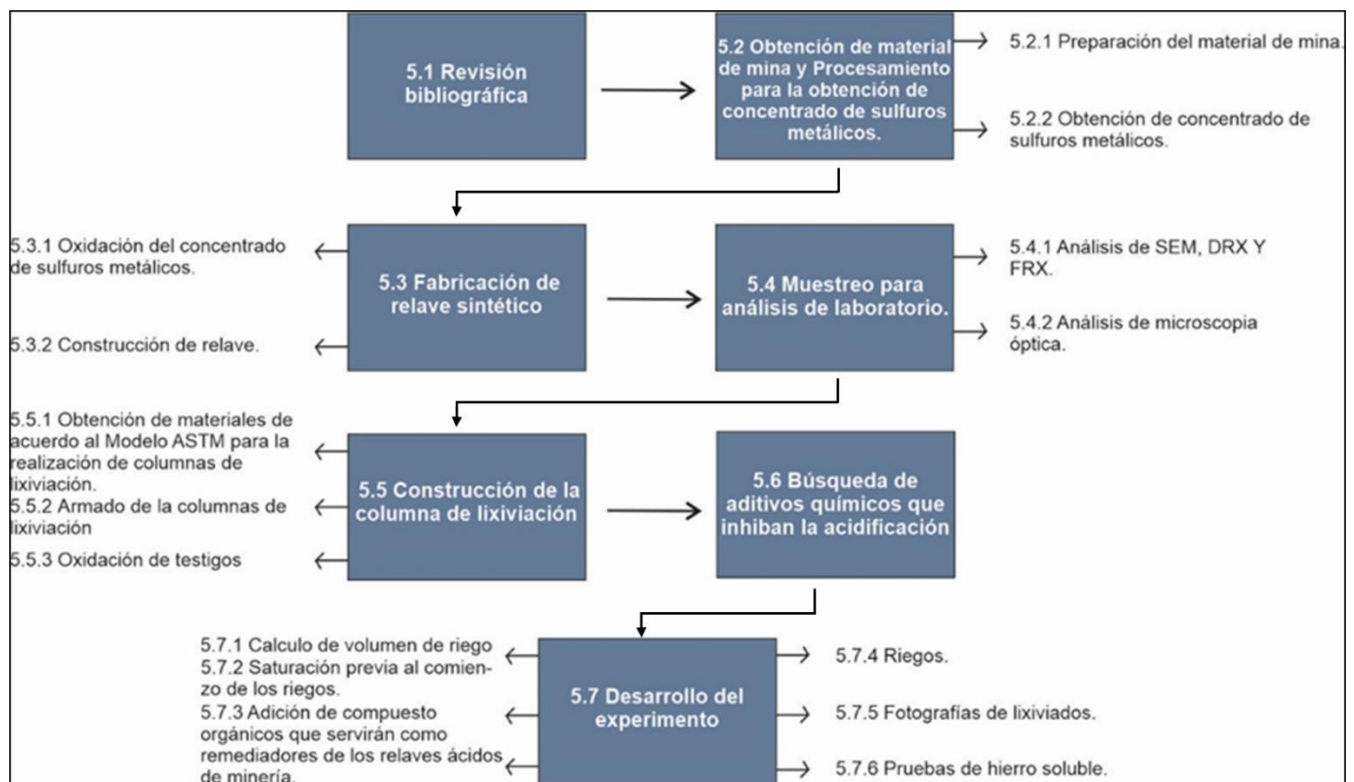
Conductividad eléctrica: 0.64 dS/m.

3 Metodología

La metodología experimental del presente trabajo consta de 7 fases, tal y como se muestra en la figura 4

Figura 4

Diagrama de flujo de la metodología experimental del trabajo de investigación



3.1 Revisión bibliográfica, planteamiento del problema y estructuración de la investigación

Antecedentes sobre tratamiento e inhibición de drenajes ácidos por diferentes métodos y mediante aditivos químicos sobre la problemática de la generación de drenajes ácidos de mina.

3.2 Obtención de material de mina y fabricación de los relaves gravimétricos

El mineral en bruto (*run of mine*, ROM) corresponde al material extraído directamente de la mina sin haber sido sometido a procesos de separación de la mena útil y la roca estéril, (Chengren et al., 2023). En este caso, se tomaron 45 kilogramos de ROM con predominancia de sulfuros metálicos como la pirita, fue obtenido de procesos mineros de extracción de oro en el Municipio de Vetas, Santander y suministrado por el Laboratorio de Beneficio de Minerales, Escuela de Ingeniería Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas de la Universidad Industrial de Santander (Figura 5), bajo la supervisión del profesor Pedro Luis Delvasto Angarita.

Figura 5

Material ROM suministrado por el Laboratorio de Beneficio de Minerales de la UIS



3.2.1 Preparación del material de mina

Los 45 kg de material fueron tamizados mediante una malla de laboratorio de 0,5 milímetros (500 μm). Posteriormente, el material retenido en la malla fue sometido a un proceso

de pulverización utilizando un molino de bolas (Figura 6). Para este procedimiento se emplearon 24 bolas de diferentes tamaños, con el fin de optimizar la eficiencia de la pulverización. El proceso se realizó con una carga aproximada de 2000 g de material por ciclo, obteniéndose entre 450 y 500 gramos de material pulverizado tras 30 minutos de operación por cada carga. Al finalizar el proceso, se recuperaron 35525 gramos de ROM pulverizado, con un tamaño de grano final 100% pasante de 0.5 milímetros.

Figura 6

Molino de bolas utilizado para la reducción de tamaños del ROM.



3.2.2 Obtención de material concentrado de sulfuros metálicos

Se procesaron los 35525 gramos de material a través de la mesa concentradora Wilfley (Figura 7), en el Laboratorio de Beneficio de Minerales de la UIS. Se establecieron diferentes parámetros, como la frecuencia de sacudidas, la tasa de alimentación del material y el flujo del agua. La frecuencia de agitación se fijó en 5,4 Hz, equivalente a 54 agitaciones cada 10 segundos, mientras que la tasa de procesamiento del material fue de 1 kilogramo cada 18 minutos. Adicionalmente, se empleó un flujo de agua constante de 650 mililitros cada 5 segundos, correspondiente a 130 mL/s.

Se obtuvo un total de 9444 gramos de material concentrado, representando un 25.85% con respecto a la masa inicial. Posteriormente, el material concentrado fue sometido a un proceso de secado en un horno convector a 100 °C (Figura 8) durante un período de seis días, con el fin de eliminar completamente la humedad residual.

Figura 7

Mesa concentradora Wilfley utilizada para la concentración de los sulfuros presentes en el ROM.



Figura 8

Secado del material obtenido en horno convector



3.3 Fabricación de relave sintético

3.3.1 Oxidación de material concentrado

De acuerdo con Ma et al. (2023), para la simulación de la acidificación minera en la pirita, se requiere preoxidar este material a través de métodos químicos. La reacción de oxidación se realiza en una solución con pH cercano a 2, a temperatura ambiente, utilizando una solución de 6 mM de Fe^{3+} preparada a partir de cloruro férrico y agua destilada. El ajuste de pH se lleva a cabo mediante la adición controlada de ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH). Para este procedimiento, se emplean aproximadamente 900 mililitros de solución, la cual se mantiene en agitación constante mediante un agitador magnético. Una vez alcanzadas las condiciones de pH y temperatura, el material es sometido al proceso de oxidación.

En el presente estudio, se utilizaron 4222 gramos del concentrado de sulfuros para simular un proceso de oxidación típico de un relave minero. La oxidación del concentrado de pirita se realizó utilizando una cantidad total de Fe^{3+} equivalente a 0,1 mol. Considerando que un mol de cloruro férrico (FeCl_3) tiene una masa molar de 165,5 g/mol, esta cantidad fue disuelta en 10 litros de agua destilada. Previamente, el pH del agua fue ajustado a 1,8 mediante la adición gradual de ácido clorhídrico (HCl). Posteriormente, la solución fue colocada en agitación constante y, tras unos minutos, se añadió el cloruro férrico. Una vez estabilizada la solución, se incorporó el concentrado de pirita. El tratamiento se llevó a cabo durante un periodo de dos horas, registrando un pH inicial del agua de 7,8; posteriormente, tras la adición de HCl, el pH descendió a 1,4, alcanzando un valor de 1,8 a la primera hora de tratamiento y un pH final de 1,9 al término del proceso (Figura 9). Una vez finalizada la etapa de oxidación, el material fue decantado y sometido a un proceso de secado en un horno convector a 100 °C durante un periodo de tres días (Figura 10).

Figura 9

Proceso de oxidación de material concentrado con cloruro férrico



Nota. Concentrado de pirita en agitación con mezcla de cloruro férrico a la derecha y cloruro férrico a la izquierda.

Figura 10

Aspecto visual del material oxidado después del proceso de secado



3.3.2 *Construcción del relave sintético.*

Según Sarker et al, (2023), de manera típica, se puede considerar que, dentro de un relave de concentración gravimétrica de oro hay 70% de silicatos, 13% de sulfuros y 10% de carbonatos. Algunas caracterizaciones mineralógicas de relaves mineros realizadas en Perú (Manrique Gálvez y Agurto Cornejo, 2022), determinó que estos materiales presentan contenidos de pirita entre el 10% y el 15% (Escalante y Dávila, 2023).

Con base en estos datos disponibles, se llevó a cabo la preparación del relave sintético mediante la mezcla del concentrado de sulfuros obtenido en el laboratorio usando la mesa de Wilfley con arena silícea comercial de tamaño de grano 0,3 – 0,4 milímetros, empleando una proporción másica de 90% arena y 10% concentrado de sulfuros, con el fin de reproducir las características mineralógicas de un relave real y generar, así, el material (relave) sintético final con el que se realizarán los ensayos de meteorización acelerada en columnas.

Para la preparación del relave sintético se utilizaron 3672 gramos de arena silícea, los cuales fueron mezclados con 408 gramos de material concentrado. Este procedimiento se repitió para las siete columnas experimentales realizadas en este trabajo. Del total de columnas, tres fueron preparadas utilizando material oxidado, mientras que las cuatro restantes se elaboraron con material no oxidado, a los fines de establecer diferencias en el comportamiento de los relaves, si se considera que son nuevos o recientes (no oxidados) o antiguos (con cierto nivel de oxidación).

3.4 Construcción de las columnas de lixiviación

3.4.1 *Obtención de materiales de acuerdo con el Modelo ASTM para la realización de columnas de lixiviación.*

En esta etapa se empleó el modelo ASTM (conjunto de normas y estándares establecidos por la American Society for Testing and Materials), para la fabricación de las columnas de lixiviación, su respectivo sistema de soporte (Figura 11) y la recreación de condiciones experimentales para el desarrollo del presente estudio. Se utilizó tubería de PVC con un diámetro interno de 10 centímetros (Figura 12), con una tapa del mismo material, destinada a la filtración y recolección del drenaje ácido generado en laboratorio (Figura 13).

Adicionalmente, se empleó malla de polietileno (Figura 14), seleccionada por su alta resistencia a medios ácidos y su no reacción frente a soluciones acuosas ácidas y alcalinas, con el fin de filtrar material sólido de tamaño de grano medio a fino. Asimismo, se utilizó tejido de fibra de vidrio (Figura 15) para la retención de partículas de grano fino.

Figura 11

Soporte para siete columnas de lixiviación



Figura 12

Tubo de PVC con 10cm de diámetro interno y 40cm de altura

**Figura 13**

Tapa/desagüe para recolectar el agua



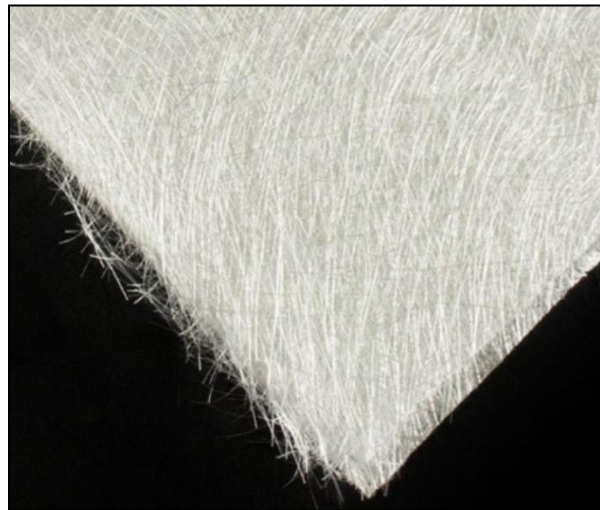
Nota. La tapa fue perforada con broca para taladro de 6,35 milímetros (1/4"), se adaptó un acople fabricado a partir de la válvula de llenado de un equipo médico de macrogoteo y un recorte de manguera de 20 centímetros de silicona resistente para combustibles.

Figura 14

Malla de polietileno

**Figura 15**

Tejido de fibra de vidrio



3.4.2 Armado de las columnas de lixiviación.

Se realizaron los cortes de la tubería de PVC de acuerdo con las dimensiones previamente establecidas, incorporando una tapa perforada, así como los filtros de fibra de vidrio y la malla de

polietileno correspondientes. Adicionalmente, se diseñó y fabricó un sistema de riego constante mediante la modificación de equipos de macrogoteo utilizados en la industria médica, empleando malla de polietileno y nylon para sujetar ambos materiales y dar la forma adecuada, tal como se evidencia en la Figura 16.

Figura 16

Sistema de goteo continuo



Figura 17

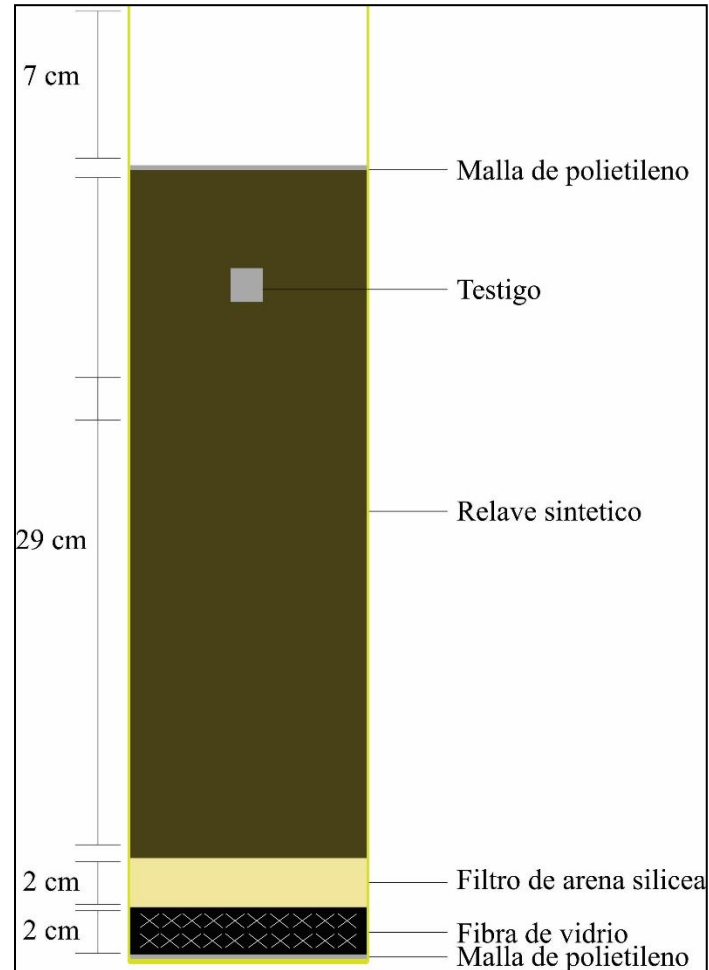
Columnas de lixiviación instaladas



La estructura interna de la columna (Figura 17) se construyó de manera estratificada. En la base se colocó una lámina de malla de polietileno, seguida de una capa de aproximadamente 2 centímetros de fibra de vidrio. Posteriormente, se adicionó una capa de 2 centímetros de arena sílicea como medio filtrante. Sobre estas capas se incorporó el relave sintético, en el cual se ubicó un cubo de pirita pura como testigo a una profundidad de 8 centímetros desde la superficie. Finalmente, en la parte superior de la columna se instaló el sistema de goteo continuo para la aplicación de los riegos.

Figura 18

Esquema de la columna de lixiviación



3.4.3 Oxidación de los cubos de pirita testigo que se insertaron en las columnas.

Con el fin de hacer un seguimiento fisicoquímico más detallado del proceso de oxidación de la pirita en las columnas de meteorización acelerada, se insertaron, en cada uno de ellos, piezas cúbicas de pirita pulida, con 10 ± 1 milímetros de arista. Se utilizaron, en total, 8 cubos de pirita como muestras testigo, los cuales 7 fueron ubicados a una profundidad de 8 cm desde la superficie de cada columna de lixiviación y uno se utilizó como muestra de control. Con el objetivo de

analizar las diferencias que experimenta el mineral, desde el inicio, hasta la finalización de experimento de meteorización acelerada en columnas.

De los siete testigos de pirita, tres fueron sometidos al mismo proceso de oxidación aplicado al relave (Figura 19) (Figura 21), utilizando un agitador magnético para mantener la mezcla en movimiento durante el proceso de oxidación. Los cuatro cubos de pirita restantes mantuvieron las condiciones iniciales (Figura 20).

Figura 19

Proceso de oxidación de los cubos testigos de pirita, en agitación magnética con cloruro férrico.

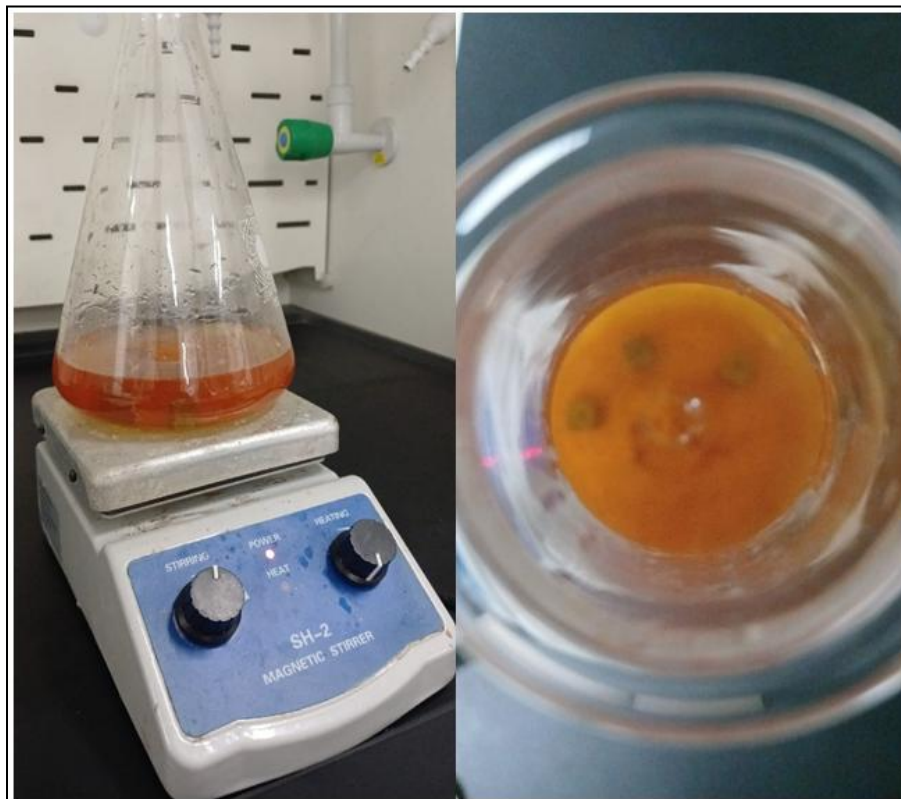


Figura 20

Testigo de pirita sin oxidar

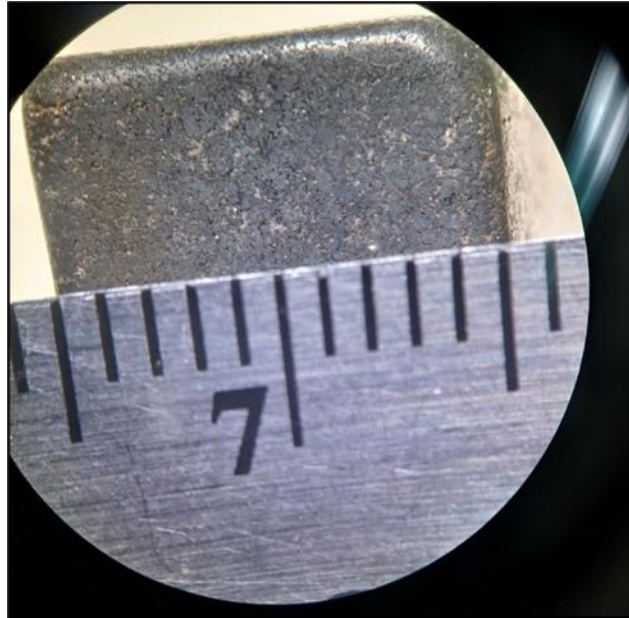


Figura 21

Testigo de pirita oxidado



3.5 Muestreo de las columnas para análisis fisicoquímicos de laboratorio.

3.5.1 Análisis de SEM, DRX Y FRX

Se tomaron dos muestras representativas del relave sintético: una correspondiente al material sin oxidar y otra al material oxidado. Posteriormente, ambas muestras fueron sometidas a un proceso de molienda mediante un molino de anillos (Figura 22), disponible en el Laboratorio de Beneficio de Minerales de la UIS, con el fin de obtener una granulometría adecuada para la realización de los estudios de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), el cual es 100% pasante en malla 400.

Figura 22

Molino de anillos



Para los estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) se recolectaron cuatro muestras representativas. Dos de ellas corresponden a los concentrados de sulfuros antes de su mezcla con arena silíceo: una sin oxidar y otra oxidada. Las dos muestras restantes se obtuvieron de los relaves

sintéticos (mezcla con arena silíceo), considerando igualmente una muestra sin oxidar y otra oxidada.

3.5.2 Análisis por microscopía óptica.

Se tomaron dos muestras representativas del relave sintético, una en estado sin oxidar y otra en estado oxidado, con el fin de elaborar dos secciones delgadas destinadas a su análisis mediante microscopía óptica.

3.6 Búsqueda de aditivos químicos que inhiban la acidificación

3.6.1 Revisión bibliográfica sobre antecedentes de aditivos químicos o biológicos utilizados que inhiban la generación de drenajes ácidos

Dentro de la información recopilada se identificaron dos sustancias de interés para la neutralización del drenaje ácido de mina (DAM). Por un lado, se consideró la leonardita, un mineraloide compuesto principalmente por ácidos húmicos y fúlvicos, ampliamente utilizado en agronomía como fertilizante y acondicionador de suelos, así como en tratamientos de aguas (Narpes Colombia S.A.S, 2016). El nombre comercial de este producto es Black Diamond, producido por la empresa Narpes en España. Por otro lado, se evaluó un extracto natural de algas *Ascophyllum nodosum*, denominado SM6® producido por la empresa Plymag, el cual, según Plymag (2020), presenta un alto contenido de ácido algínico, compuesto que resulta útil como agente protector frente a la presencia de metales radiactivos.

3.7 Cálculo de volumen de riego a aplicar

Para el inicio de los riegos fue necesario calcular el volumen de agua destilada a aplicar, con el fin de simular condiciones de precipitación. Para ello, se utilizaron datos de precipitación obtenidos del sitio web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), correspondientes al municipio de Vetás, Santander (Tabla 2). Se recopilaron registros

mensuales de precipitación desde el año 1985 hasta la actualidad. A partir de esta información, se calculó el promedio histórico de precipitación de los meses de febrero, junio y diciembre, y con estos valores se realizó un escalamiento hidrológico aplicado a la columna de lixiviación. Este procedimiento permitió determinar el volumen de riego mensual correspondiente a cada columna. Con base en este esquema, se estableció la aplicación de dos riegos por semana, al inicio y al final de esta, con el fin de simular un mes de precipitación por cada semana de ensayo (Tabla 2).

Fórmula para calcular el volumen de riego aplicado:

$$\text{Precipitación } \left(\frac{L}{m^2} \right) * \text{area transversal de la columna } (m^2) = \text{ml de riego Ecu. 6}$$

Tabla 2

Tabla de promedios de precipitaciones desde 1985-2025

Mes	Precipitación promediada (L/m ²)
Junio	67,13
Diciembre	36,43
Febrero	49,09

3.8 Saturación previa al comienzo de los riegos.

Las columnas de lixiviación fueron saturadas con el propósito de determinar la capacidad de retención de agua del material y establecer un punto de referencia para el inicio de la evacuación del lixiviado. Adicionalmente, este procedimiento permitió eliminar bolsas de aire atrapadas en el material, favoreciendo un flujo de agua más uniforme y controlado, así como prevenir la formación de canales preferenciales que podrían alterar la distribución del lixiviado durante el desarrollo del experimento. Se efectuaron dos riegos de 500 mililitros, separados por un intervalo de tres días. Cada riego se aplicó de manera gradual a lo largo de toda la mañana.

3.9 Adición de compuestos orgánicos que servirán como remediadores de los relaves ácidos de minería.

Para el diseño experimental, se dispuso de un total de siete columnas, de las cuales cinco fueron intervenidas con dos aditivos bioestimulantes de aplicación agrícola: SM6, un extracto líquido derivado de algas marinas (*Ascophyllum nodosum*), y Black Diamond, una enmienda orgánica húmica líquida, a base de leonardita. Las dos columnas restantes se usaron como muestra control. La dosis de aditivo a utilizar se calculó teniendo en cuenta el Carbono Orgánico Total (COT) promedio presente en el suelo, y la disponibilidad del aditivo, se fijó una concentración de 0.25% COT para cada columna. Teniendo en cuenta el peso total de relleno (4000 gramos) se desarrolló el siguiente procedimiento matemático:

$$\frac{x}{4000 \text{ g} + x} * 100 = 0.25\% \text{ COT}$$

$$\frac{x}{4000 + x} * 100 = 0.25$$

$$(4000 + x) * \left(\frac{100x}{4000 + x} \right) = (0.25) * (4000 + x)$$

$$100x = 1000 + 0.25x$$

$$100x - 0.2x = 1000$$

$$99.8x = 1000$$

$$x = \frac{1000}{99.8} = 10.02$$

$$x = 10 \text{ g COT} \rightarrow 0.25\% \text{ COT}$$

Luego de tener la masa de COT que debía tener cada columna, se verificó la concentración en los aditivos, teniendo así un total de $20 \frac{\text{gramos}}{\text{Litro}}$ de COT para el SM6 y $100 \frac{\text{gramos}}{\text{Litro}}$ de COT para el Black Diamond. Posteriormente se realizó la adición para cada columna, teniendo así al final, los tratamientos descritos en la Tabla 3:

Tabla 3

Tratamientos realizados en cada columna de lixiviación

Tratamientos aplicados por columna de lixiviación		
Nombre de columna	Descripción	Cantidad de producto aplicado
SM6 NO	Columna con material no oxidado con tratamiento de SM6	500ml de SM6 / 10g COT
BD NO	Columna con material no oxidado con tratamiento de Black Diamond	100ml de BD / 10g COT
Mezcla NO	Columna con material no oxidado con tratamiento de SM6 y Black Diamond	100ml de BD + 200ml de SM6 / 14g COT
Control NO	Columna con material no oxidado sin tratamientos	No aplica
SM6 O	Columna con material oxidado con tratamiento de SM6	500ml de SM6 / 10g COT
BD O	Columna con material oxidado con tratamiento de Black Diamond	100ml de BD / 10g COT
Control O	Columna con material oxidado sin tratamientos	No aplica

Nota. El material se categorizó como Oxidado (O) y No Oxidado (NO).

3.10 Riegos

Se realizaron 18 riegos en el transcurso de 13 semanas, utilizando agua destilada. Este procedimiento permitió disponer de agua con condiciones neutras, la cual fue empleada en las siete columnas experimentales, garantizando la homogeneidad y el control de las condiciones de riego durante el desarrollo del ensayo.

Durante cada semana, se recolectó el lixiviado por cada columna desde su parte inferior. A cada muestra se le determinaron los parámetros de volumen recolectado, pH y conductividad eléctrica, utilizando un medidor multiparámetros referencia HANN-HI9812-5 de la marca Hanna Instruments® suministrado por el Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica. Posteriormente, las muestras de lixiviado fueron almacenadas en frascos recolectores debidamente identificados para su conservación y análisis posterior (Figura 23).

Adicionalmente, se realizaron análisis para determinar la concentración de hierro soluble en los lixiviados recolectados durante las semanas 1, 5, 12 y 13 del experimento.

Figura 23

Columnas de lixiviación con sistema de micro goteo y sistema recolector inferior. Inicio de pruebas



3.11 Determinación de hierro soluble remanente en los sólidos de la columna al finalizar el experimento.

Se retiraron 50 gramos de muestra de cada columna, las cuales fueron sometidas a un proceso de secado en horno a una temperatura de 80 °C durante 24 horas. Una vez secas, se pesaron 10 gramos exactos de cada muestra.

Figura 24

Mezclas en agitación para extracción de hierro presente en el sólido



Posteriormente, cada muestra se colocó en un matraz de laboratorio junto con 100 mililitros de agua destilada y se mantuvo en agitación a 50 rpm durante 24 horas, con el fin de favorecer la disolución de los componentes solubles (Figura 24).

Finalizado este proceso, el material sólido se dejó decantar y la solución resultante fue filtrada. De la solución filtrada se tomaron 50 mililitros, a los cuales se añadieron 2 mililitros de ácido clorhídrico (Figura 25), este último procedimiento se realizó también con las muestras de lixiviado de las semanas anteriormente mencionadas para ser enviadas al laboratorio para el análisis de hierro soluble.

Figura 25

Proceso de adición de HCl a la solución



4 Resultados

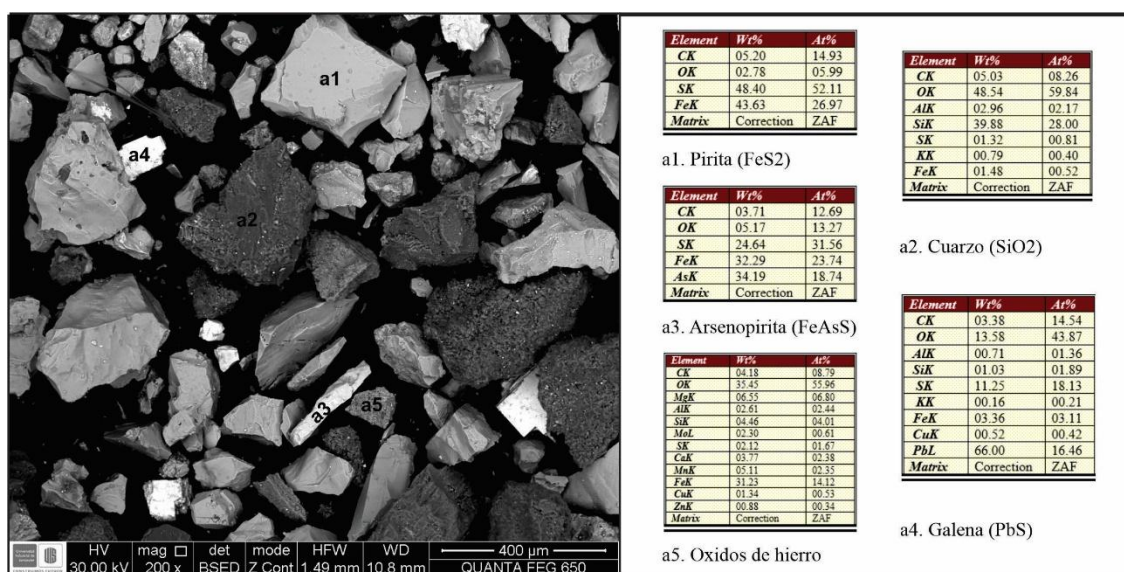
4.1 Caracterización de los materiales de partida

Se analizaron cuatro tipos de muestras: Concentrado no oxidado, concentrado oxidado, relave sintético no oxidado y relave sintético oxidado (mezcla de concentrado de sulfuros y arena silíceo). Los análisis permitieron identificar las principales fases minerales presentes y evaluar los cambios mineralógicos asociados a los procesos de oxidación y dilución con material silíceo.

4.1.1 Concentrado sulfuros no oxidados

Figura 26

Imagen SEM y análisis cuantitativo del concentrado de sulfuros no oxidados



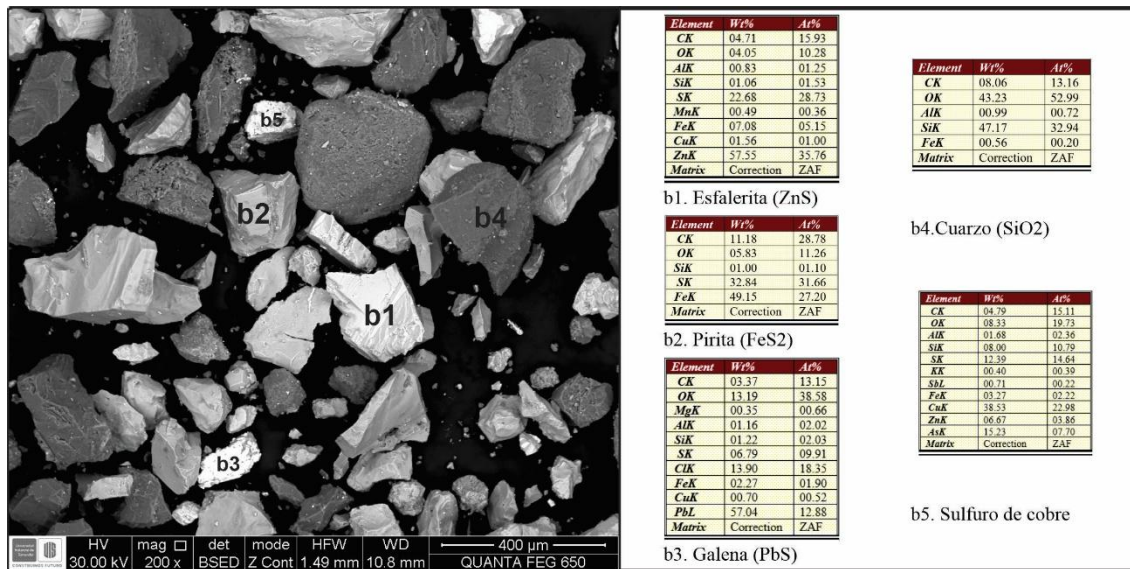
El concentrado de sulfuros no oxidado presenta una mineralogía predominantemente sulfurosa, con un 50% de pirita. Visualmente, estos granos destacan por su excelente grado de preservación, mostrando una morfología angulosa de caras lisas y bien definidas. Posteriormente se encuentra el cuarzo (25%), de manera secundaria se encontraron algunos granos de sulfuros metálicos secundarios como la galena y arsenopirita en un 20% combinado. Finalmente, se detectó

una fracción menor de óxidos de hierro (5%), probablemente hematita o goethita, que actúan como indicadores de un estado de oxidación antes del tratamiento experimental (Figura 26).

4.1.2 Concentrado sulfuros oxidados

Figura 27

Imagen SEM y análisis cuantitativo del concentrado de sulfuros oxidados



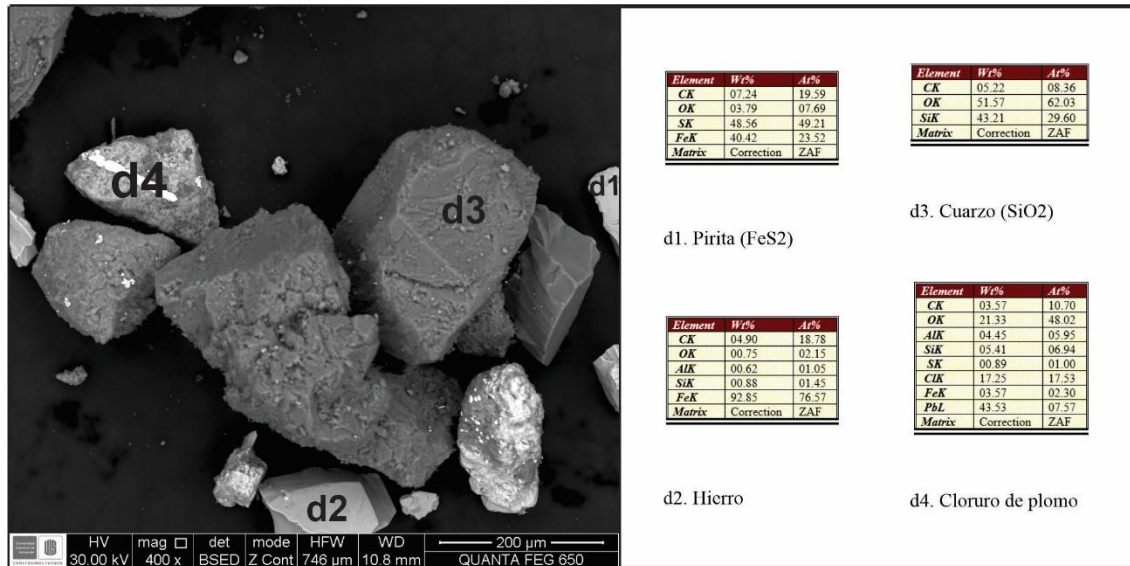
Tras el proceso de oxidación inducida con cloruro férrico, el concentrado de sulfuros mantiene la predominancia de pirita en un 50%; sin embargo, se evidencia un notable desgaste en los granos, manifestado en texturas de corrosión y pérdida de la lisura original de sus caras cristalinas. La galena, se encuentra presente en un 15%; no obstante, su porcentaje atómico muestra una pérdida progresiva de azufre, el cual está siendo desplazado por la incorporación de cloro (Figura 27).

Por su parte, el cuarzo permanece inalterado como componente inerte (25%), mientras que se identificaron trazas menores de esfalerita y sulfuros de cobre en proceso de alteración.

4.1.3 Relave sintético oxidado

Figura 28

Imagen SEM y análisis cuantitativo del relave sintético oxidado

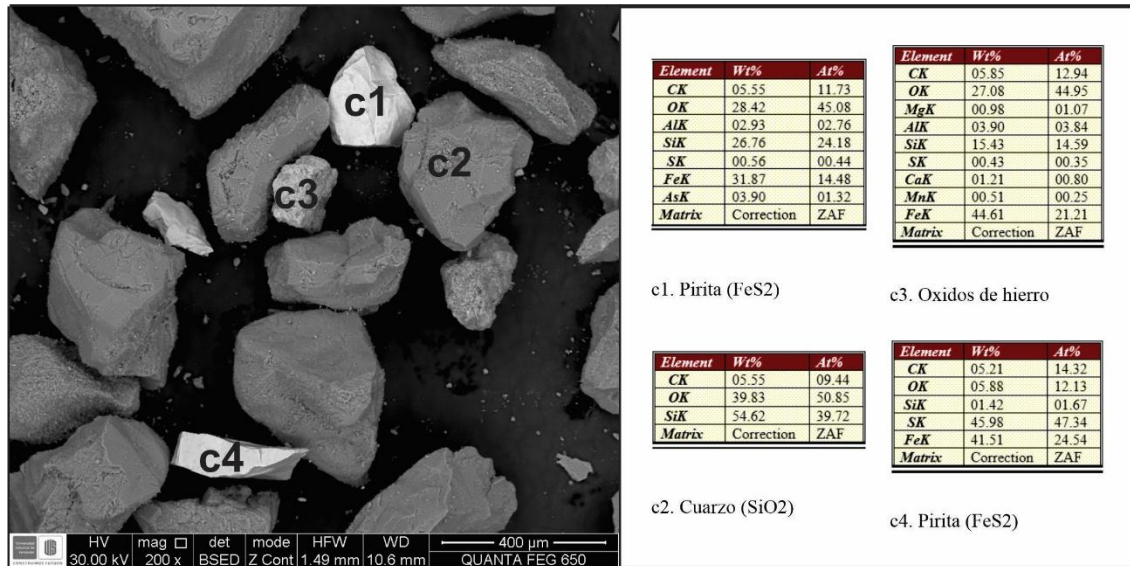


El relave sintético oxidado está dominado por una matriz silícea (cuarzosa) que constituye el 90% de la muestra, Dentro de esta matriz, se identifica un 10% de pirita y sulfuros metálicos (galena, esfalerita, etc.), la cual exhibe rasgos texturales de oxidación, como bordes de corrosión. La presencia de cloruro de plomo es una fase secundaria derivada de la alteración química de la galena por la acción del agente oxidante (Figura 28).

4.1.4 Relave sintético no oxidado

Figura 29

Imagen SEM y análisis cuantitativo del relave sintético no oxidado

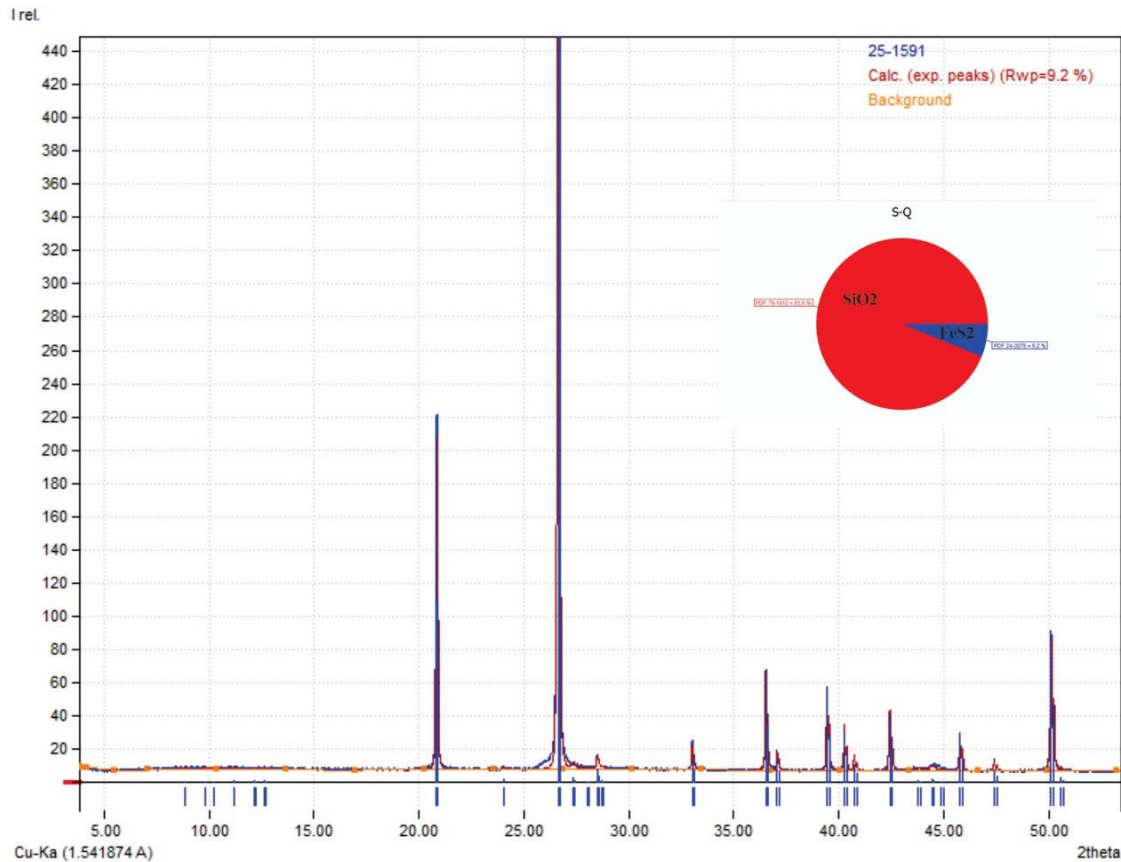


El relave sintético no oxidado está compuesto en un 90% de matriz de cuarzo. Se identifica un 10% de sulfuros metálicos (pirita, galena y esfalerita), los cuales se presentan en buenas condiciones, caracterizándose por el desarrollo de caras lisas y morfologías angulosas bien definidas. Asimismo, se registró una fracción menor de óxidos de hierro (Figura 29).

4.2 Análisis de difracción y fluorescencia de rayos x

4.2.1 Relave sintético no oxidado

El análisis de Difracción de Rayos X (DRX) identifica al cuarzo como la fase mineralógica predominante, representando aproximadamente el 93.8% de la muestra. Como fase secundaria, se identificó la pirita, la cual constituye el 6.2% restante de la mineralogía detectable por este método (Figura 30).

Figura 30*Difractograma del relave sintético no oxidado*

Nota: Se muestra en el diagrama porcentual una matriz predominantemente cristalina compuesta por cuarzo (fase mayoritaria en rojo) y pirita (fase secundaria en azul).

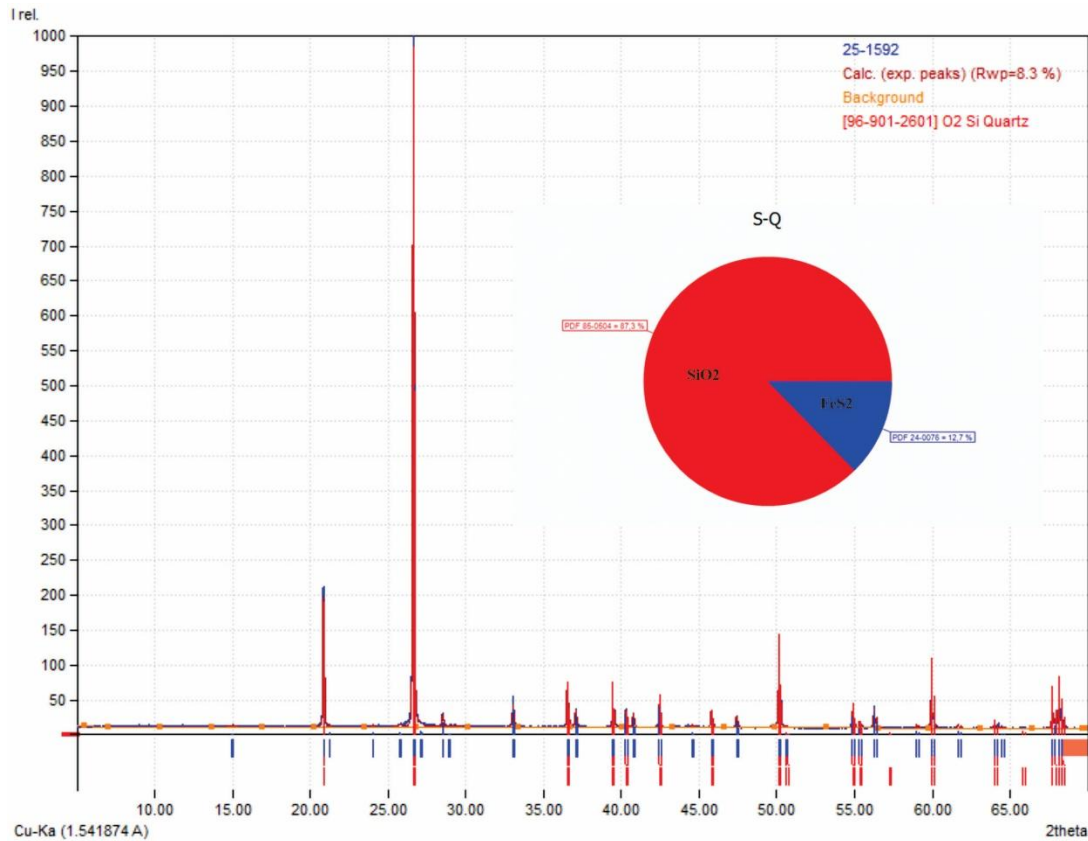
Por otro lado, los resultados de fluorescencia de rayos X (Tabla 4) complementan este análisis al revelar la presencia de elementos metálicos en pequeñas cantidades. Si bien, el silicio (34.97%) y el hierro (6.56%) ratifican la presencia de cuarzo y pirita respectivamente, el FRX detecta concentraciones de plomo (0.67%), zinc (0.40%), cromo (0.61%) y arsénico (0.48%) (Tabla 4).

Tabla 4*Resultados FRX del relave sintético no oxidado*

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)	ERROR ESTADÍSTICO (%)	LÍMITE DE DETECCIÓN (%)
Si	34,97%	± 0,0761	22
Fe	6,56%	± 0,0193	25
S	1,64%	± 0,0147	24
Pb	0,67%	± 0,0174	125
Cr	0,61%	± 0,00780	28
As	0,48%	± 0,00576	36
Zn	0,40%	± 0,00457	26
Ni	0,37%	± 0,00612	24
Al	0,17%	± 0,00714	87
Mo	0,16%	± 0,00428	47
Cu	0,11%	± 0,0130	27
Otros	53,86%	-	-

4.2.2 Relave sintético oxidado

Se identificó una matriz mayoritariamente cristalina dominada por cuarzo (87.3%) y pirita (12.7%) (Figura 31).

Figura 31*Difractograma del relave oxidado*

Nota: El difractograma revela una matriz predominantemente cristalina compuesta por cuarzo (fase mayoritaria en rojo) y pirita (fase secundaria en azul).

El análisis de FRX permitió cuantificar el contenido de silicio (33.15%), hierro (9.45%) y azufre (3.23%), y pequeñas cantidades de plomo (0.69%), zinc (0.69%) y arsénico (1.07%) (Tabla 5).

Tabla 5*Resultados FRX del relave sintético oxidado*

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)	ERROR ESTADÍSTICO (%)	LÍMITE DE DETECCIÓN (%)
Si	33,15%	0,0760	0,0027
Fe	9,45%	0,0231	0,0025
S	3,23%	0,0205	0,0024
As	1,07%	0,00730	0,0038
Pb	0,69%	0,0184	0,0129
Zn	0,69%	0,00568	0,0027
Cr	0,45%	0,00683	0,0029
Ni	0,27%	0,00618	0,0026
Cu	0,16%	0,00909	0,0029
Al	0,15%	0,00790	0,0098
Mo	0,10%	0,00394	0,0044
Otros	50,59%		

4.3 Comportamiento de las columnas

Se realizaron un total de 18 riegos a lo largo de un periodo de 13 semanas (Tabla 6), Estos riegos se diseñaron para simular las condiciones de precipitación correspondientes a los meses de junio (lluvioso), diciembre (seco) y febrero (promedio), permitiendo así considerar la influencia de distintas condiciones climáticas sobre el comportamiento del sistema.

Tabla 6*Información de los riegos*

Semana	Fecha	Riego (ml)	Total (ml)	Precipitación Real (L/m ²)	Precipitación Simulada (L/m ²)	Mes simulado		
1	27/10/2025	75,74	151,48	18,70	67,12	JUNIO		
	30/10/2025	75,74						
2	4/11/2025	66,755	133,51	16,48				
	14/11/2025	66,755						
3	10/11/2025	54,53	109,06	13,46				
	13/11/2025	54,53						
4	18/11/2025	74,815	149,63	18,47				
	21/11/2025	74,815						
5	24/11/2025	68,6	137,2	16,94				
	28/11/2025	68,6						
6	2/12/2025	39,535	79,07	9,76			36,43	DICIEMBRE
	5/12/2025	39,535						
7	8/12/2025	39,4	78,8	9,73				
	12/12/2025	39,4						
8	-	-	-	-				
9	-	-	-	-				
10	20/01/2026	66,13	66,13	8,16				
11	27/01/2026	64,49	64,49	7,96				
12	1/02/2026	133,51	133,51	16,48	49,09	FEBRERO		
13	9/02/2026	133,51	133,51	16,48				
TOTAL		1236,39	1236,39	152,64			152,64	

4.3.1 *Características fisicoquímicas de los lixiviados*

Algunas muestras de lixiviado presentaron valores de conductividad fuera del rango de medición del equipo, por tanto, se aplicó un procedimiento de dilución seriada con agua destilada, en proporciones 1:2 y, de ser necesario, 1:4, hasta obtener lecturas dentro del rango del equipo (Tabla 7). Posteriormente, los valores de conductividad fueron extrapolados al estado original de la muestra mediante un ajuste lineal, utilizando herramientas de análisis en Microsoft Excel.

Tabla 7*Datos de Volumen, pH y conductividad eléctrica de los lixiviados.*

Columna	Ph	Conductividad	Extrapolacion	Volumen	Pasivante
Semana 1					
NO OXIDADO					
1	7.2	Error	12000	70 ml	SM6
2	6.8	2450		90 ml	BD
3	4.8	7050		85 ml	SM6-BD
4	6	1630		105 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	6.9	Error	13874	80 ml	SM6
2	6.5	3350		85 ml	BD
3	4	1190		110 ml	CONTROL
Semana 2					
NO OXIDADO					
1	5.4	Error	11603	60 ml	SM6
2	7	3800		80 ml	BD
3	5.3	Error	12324	75 ml	SM6-BD
4	6.1	2260		98 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	5.7	Error	29253	70 ml	SM6
2	6.5	4800		80 ml	BD
3	3.9	1230		100 ml	CONTROL
Semana 3					
NO OXIDADO					
1	7.5	Error	19021	15 ml	SM6
2	7.5	5150		96 ml	BD
3	5.1	Error	16474	137 ml	SM6-BD
4	5.8	2290		79 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	6.3	Error	28234	52 ml	SM6
2	6.3	5220		114 ml	BD
3	3.6	1440		76 ml	CONTROL
Semana 4					
NO OXIDADO					
1	6.4	Error	21151	100 ml	SM6
2	7.5	4170		135 ml	BD
3	5	Error	17894	125 ml	SM6-BD
4	5.9	2180		120 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	6.2	Error	34654	15 ml	SM6
2	6.2	4580		130 ml	BD
3	3.5	1580		120 ml	CONTROL
Semana 5					
NO OXIDADO					
1	5.2	Error	30307	257 ml	SM6
2	7.4	3960		125 ml	BD
3	5.1	Error	17459	87 ml	SM6-BD
4	6	2190		110 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	5.2	Error	29768	150 ml	SM6
2	6	4140		135 ml	BD
3	3.4	1740		110 ml	CONTROL
Semana 6					
NO OXIDADO					
1	7.6	Error	35192	22 ml	SM6
2	7.4	3660		74 ml	BD
3	5.1	Error	34469	80 ml	SM6-BD
4	5.9	2140		67 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	6	Error	26519	27 ml	SM6
2	6	3760		60 ml	BD
3	3.5	1690		70 ml	CONTROL

Semana 7					
NO OXIDADO					
1	6.1	Error	29438	32 ml	SM6
2	6.8		3730	34 ml	BD
3	5.1	Error	18374	50 ml	SM6-BD
4	6		2130		
OXIDADA					
1	5.1	Error	32454	37 ml	SM6
2	5.6		3220	68 ml	BD
3	3.8		1600	52 ml	CONTROL
Semana 10 +11					
NO OXIDADO					
1					SM6
2	7.6		4120	48 ml	BD
3	8	Error	15336	15 ml	SM6-BD
4					
OXIDADA					
1					SM6
2	6.3		3140	18 ml	BD
3	3		2980		CONTROL
Semana 12					
NO OXIDADO					
1	6.5	Error	33754	58 ml	SM6
2	7.1		4490	220 ml	BD
3	5.6	Error	18344	195 ml	SM6-BD
4	5.9		2220	115 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	5.1	Error	20308	630 ml	SM6
2	4.1		3480	175 ml	BD
3	2.9		3250	150 ml	CONTROL
Semana 13					
NO OXIDADO					
1	6.2	Error	32754	125 ml	SM6
2	7		4290	107 ml	BD
3	7.4	Error	19344	110 ml	SM6-BD
4	5.8		2320	113 ml	CONTROL
OXIDADA					
1	5.3	Error	21080	120 ml	SM6
2	4		3110	117 ml	BD
3	2.9		3250	114 ml	CONTROL

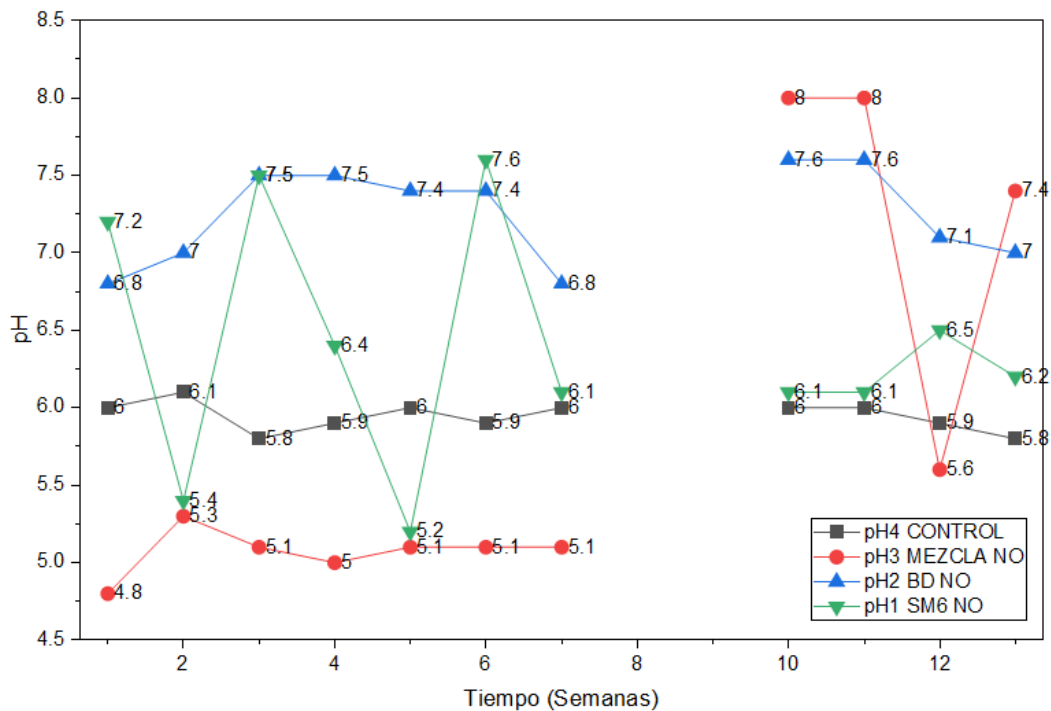
4.3.2 Gráficos pH/Conductividad vs Semanas

En las columnas no oxidadas, el control mantuvo valores de pH estables entre 5,8 y 6,1, sin alcanzar condiciones de drenaje ácido ($\text{pH} < 4$). El tratamiento con Black Diamond presentó los valores más altos y estables, generalmente entre 6,8 y 7,5, lo que evidencia una adecuada neutralización de la acidez residual, incluso después del periodo seco. Por su parte, la columna tratada con SM6 mostró un comportamiento oscilante, con valores entre 5,2 y 7,5, y una posterior

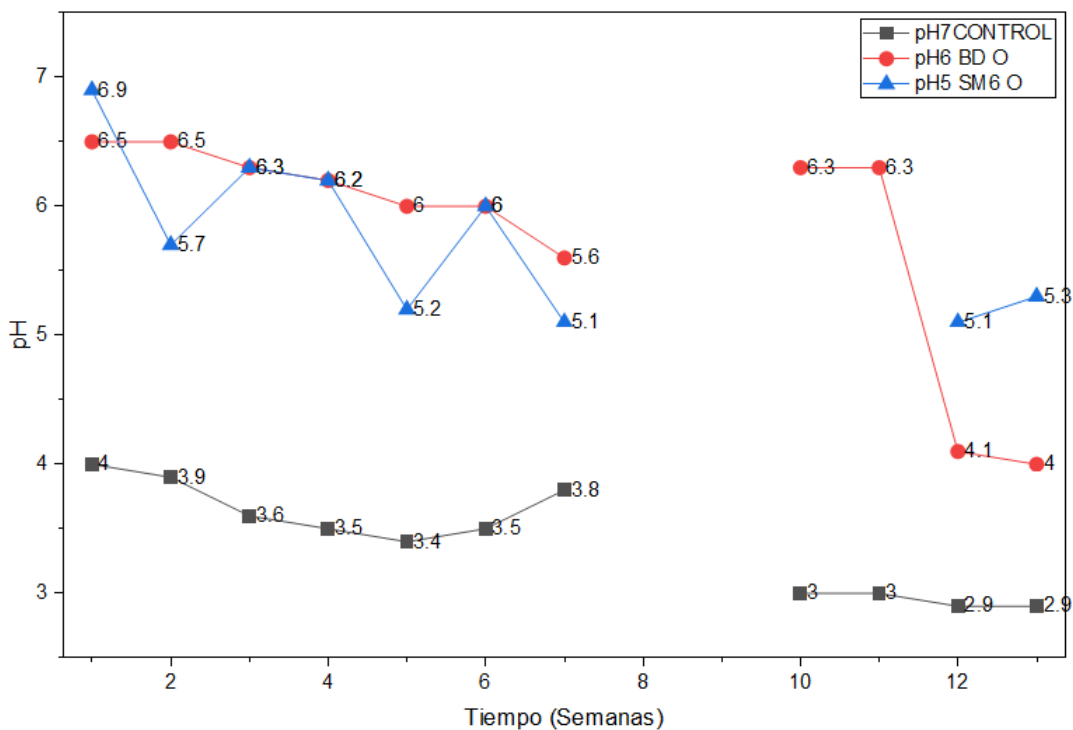
estabilización en el rango de 6,2 a 6,5. La columna de mezcla inició con pH ácido (4,8), pero tras el periodo seco alcanzó un máximo cercano a 8, evidenciando la mayor alcalinización del sistema (Figura 32).

Figura 32

Gráfico Columnas no oxidadas pH vs Semanas



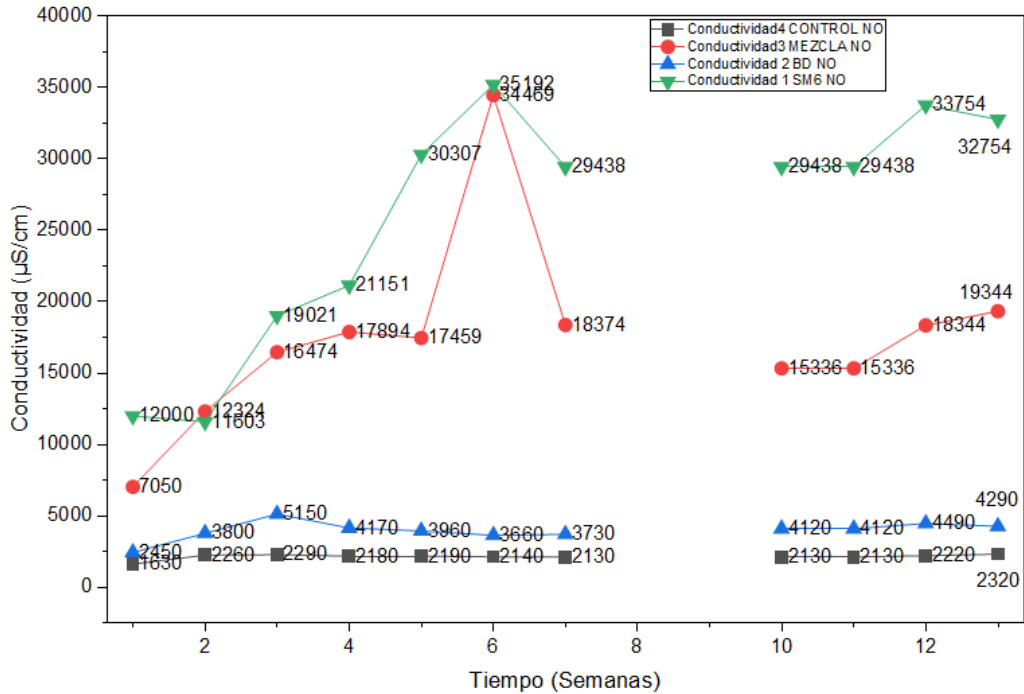
En las columnas oxidadas, el control evidenció un comportamiento ácido sostenido, alcanzando valores cercanos a pH 3 al final del experimento, lo que confirma su carácter generador de acidez. El tratamiento con SM6 mostró una recuperación inicial hasta valores cercanos a pH 7, seguida de fluctuaciones y una estabilización final por encima de pH 5. En contraste, Black Diamond mantuvo estabilidad durante las primeras 11 semanas; sin embargo, hacia el final del experimento se observó una disminución abrupta hasta pH 4 (Figura 33).

Figura 33*Gráfico Columnas oxidadas pH vs Semanas*

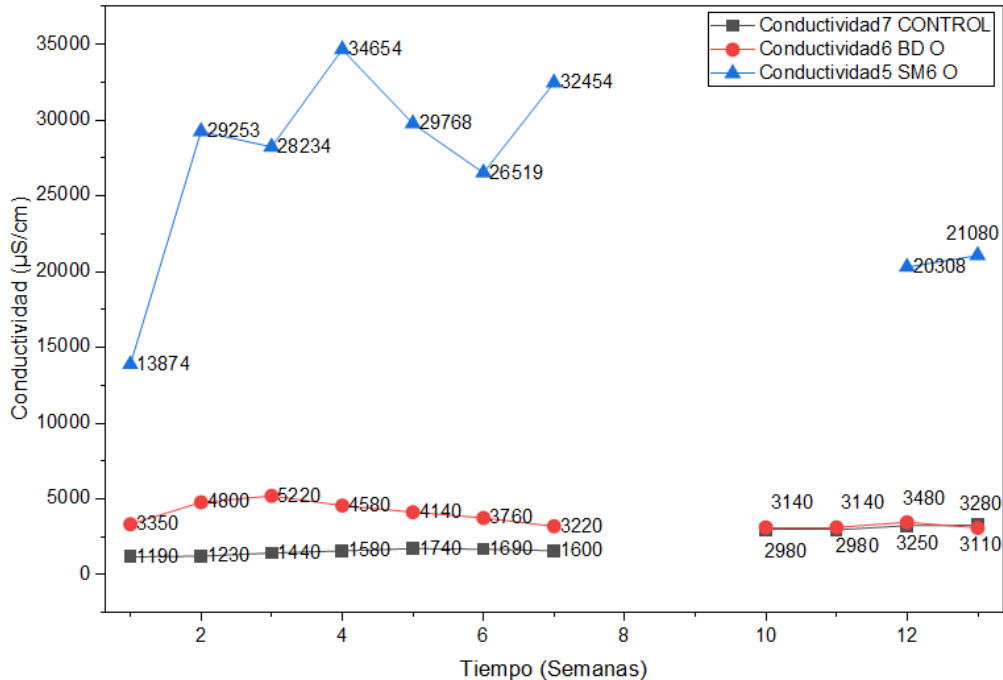
En las columnas no oxidadas, el control se mantuvo estable con valores bajos de conductividad a lo largo del experimento. El tratamiento con Black Diamond presentó un comportamiento similar, aunque con valores ligeramente superiores. Por su parte, la columna tratada con SM6 registró las mayores conductividades, alcanzando valores de hasta $35000 \mu\text{S}/\text{cm}$, lo que se atribuye a la alta carga iónica aportada por este bioestimulante. La columna de mezcla mostró un comportamiento intermedio, con valores entre 15000 y $20000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 34).

Figura 34

Gráfico Columnas no oxidadas Conductividad vs Semanas



En las columnas oxidadas, el control también se mantuvo con valores bajos y constantes. El tratamiento con Black Diamond evidenció una estabilización progresiva a partir de la semana 3. En contraste, la columna tratada con SM6 presentó nuevamente las conductividades más altas, asociadas tanto a su elevada carga iónica (Figura 35).

Figura 35*Gráfico Columnas oxidadas Conductividad vs Semanas*

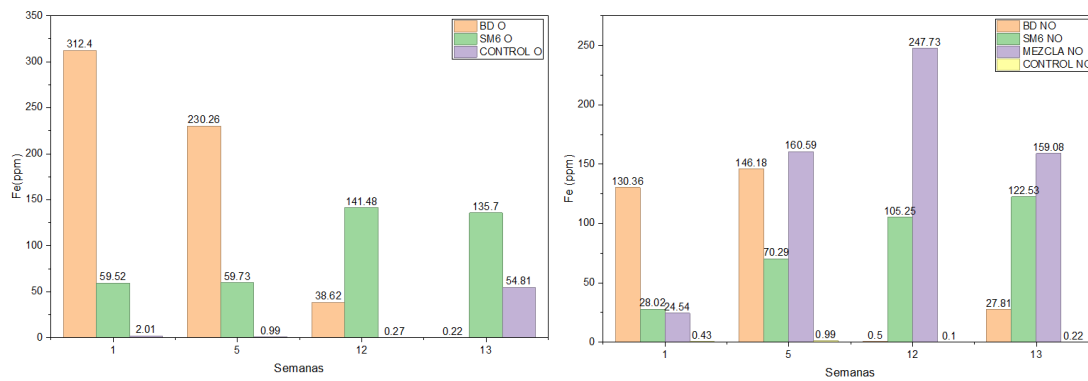
4.3.3 *Concentración de hierro en los lixiviados*

En estos sistemas, se espera que ocurra la oxidación de la pirita, por lo tanto, genere acidez y liberación de hierro en solución, que se va a lixiviar a través de la columna, sin embargo, los resultados del hierro disuelto en los lixiviados se vieron afectados por la carga mineral intrínseca de los tratamientos aplicados. De acuerdo con las caracterizaciones de los productos, el Black Diamond aportó una carga inicial significativa de 2731 ppm de hierro, mientras que el SM6 presentó un contenido de 53 ppm.

No obstante, en la Figura 36 se evidencia una disminución en la concentración de hierro en la columna tratada con Black Diamond a partir de la semana 5. Asimismo, se observa un incremento en la concentración de hierro en el lixiviado correspondiente al control oxidado hacia la etapa final del experimento.

Figura 36

Resultados de los análisis de hierro disuelto en los lixiviados recopilados en la semana 1, 5, 12 y 13 del experimento.



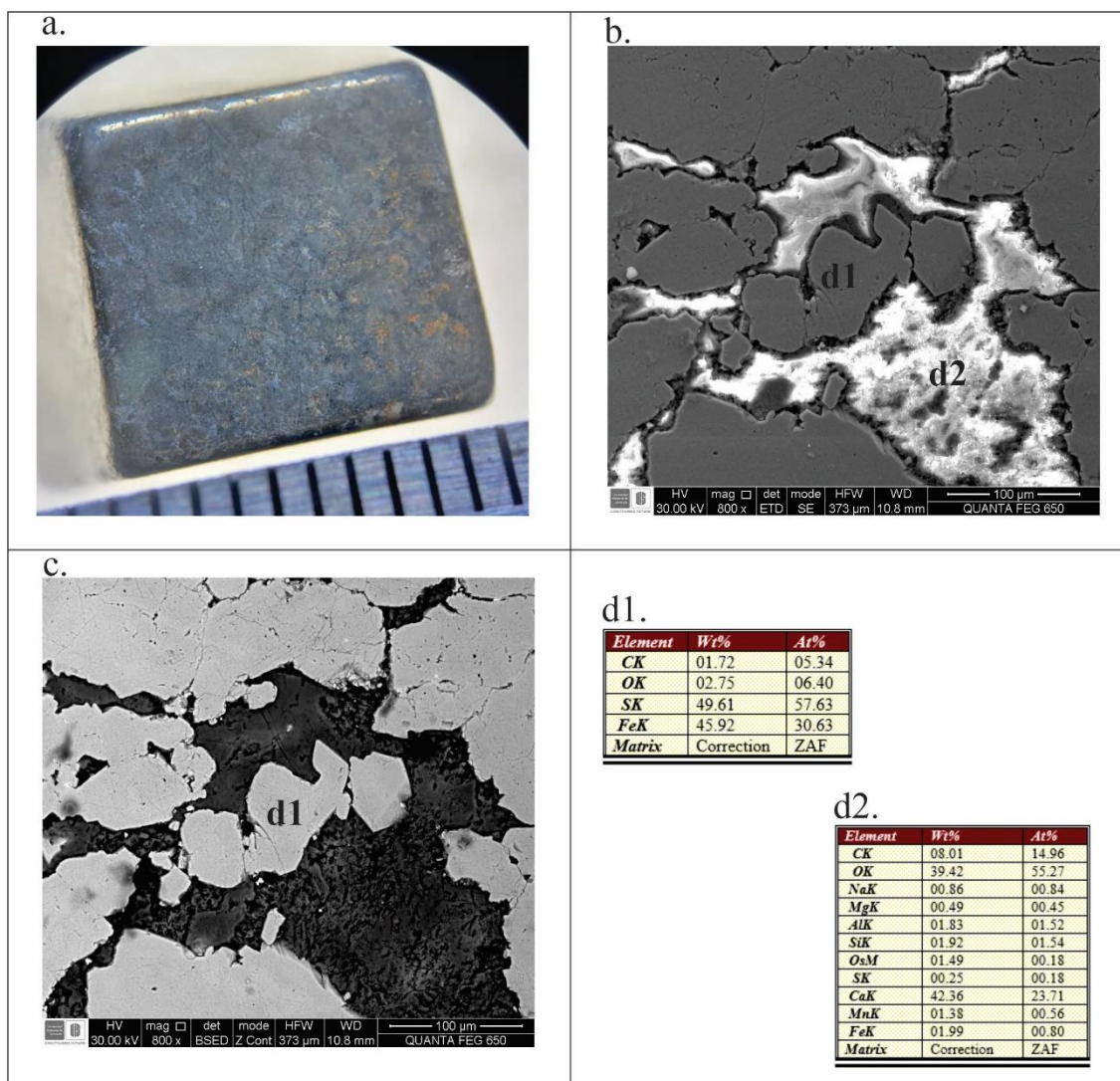
Nota. Columnas oxidadas a la izquierda, columnas no oxidadas a la derecha.

4.4 Análisis de modificación superficial de los testigos de pirita

4.4.1 Testigo Columna Control no oxidada

Figura 37

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna control no oxidada



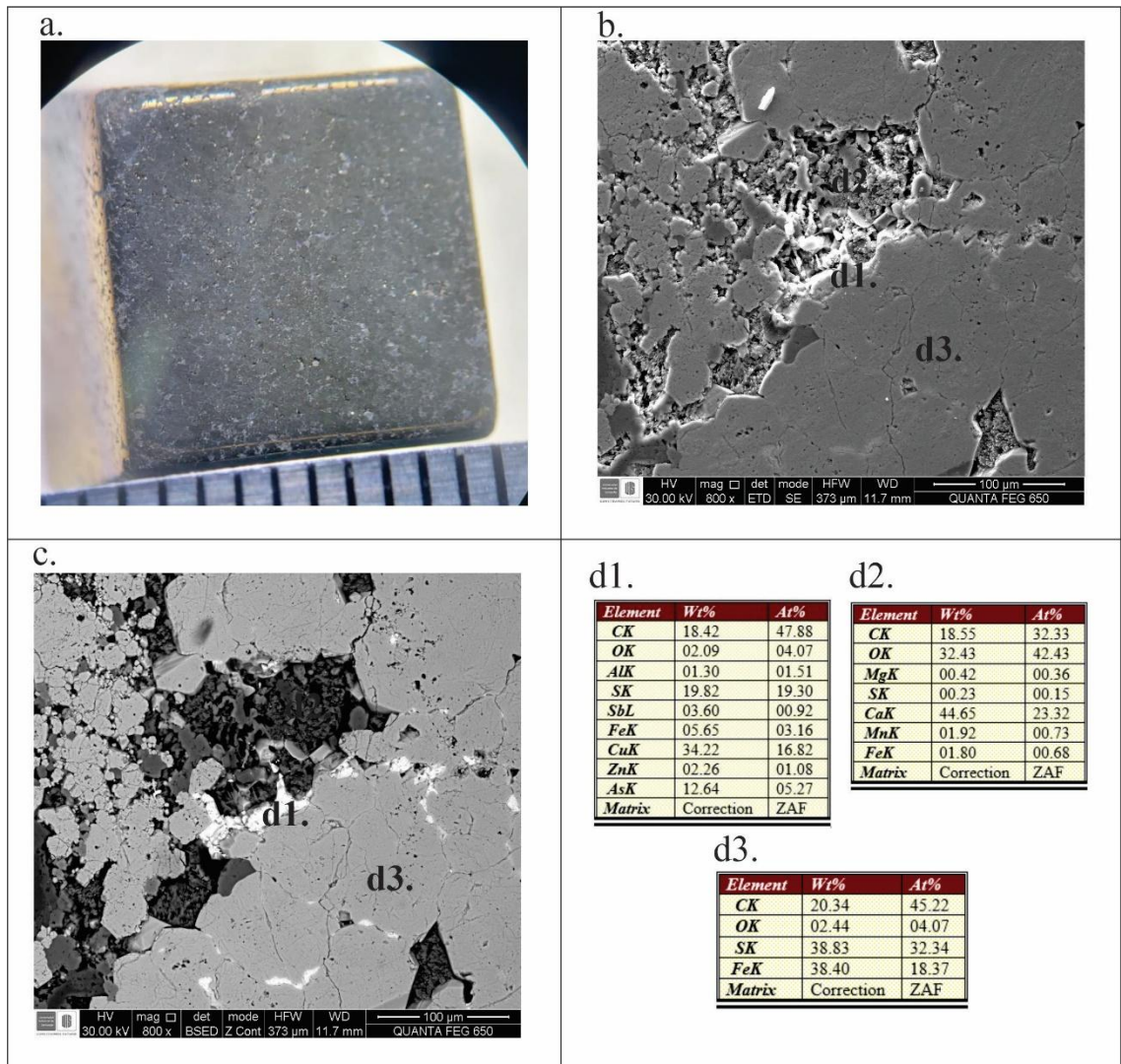
Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. c. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Pirita (FeS₂). d2. Mineral carbonatado.

Se observó pirita con bajos niveles de oxígeno, sin embargo, se observan capas rojizas de óxidos en la vista macro (figura a). Asimismo, se identificaron minerales carbonatados relleno de las fracturas del mineral (Figura 37).

4.4.2 Testigo Columna SM6 no oxidada

Figura 38

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna SM6 no oxidada



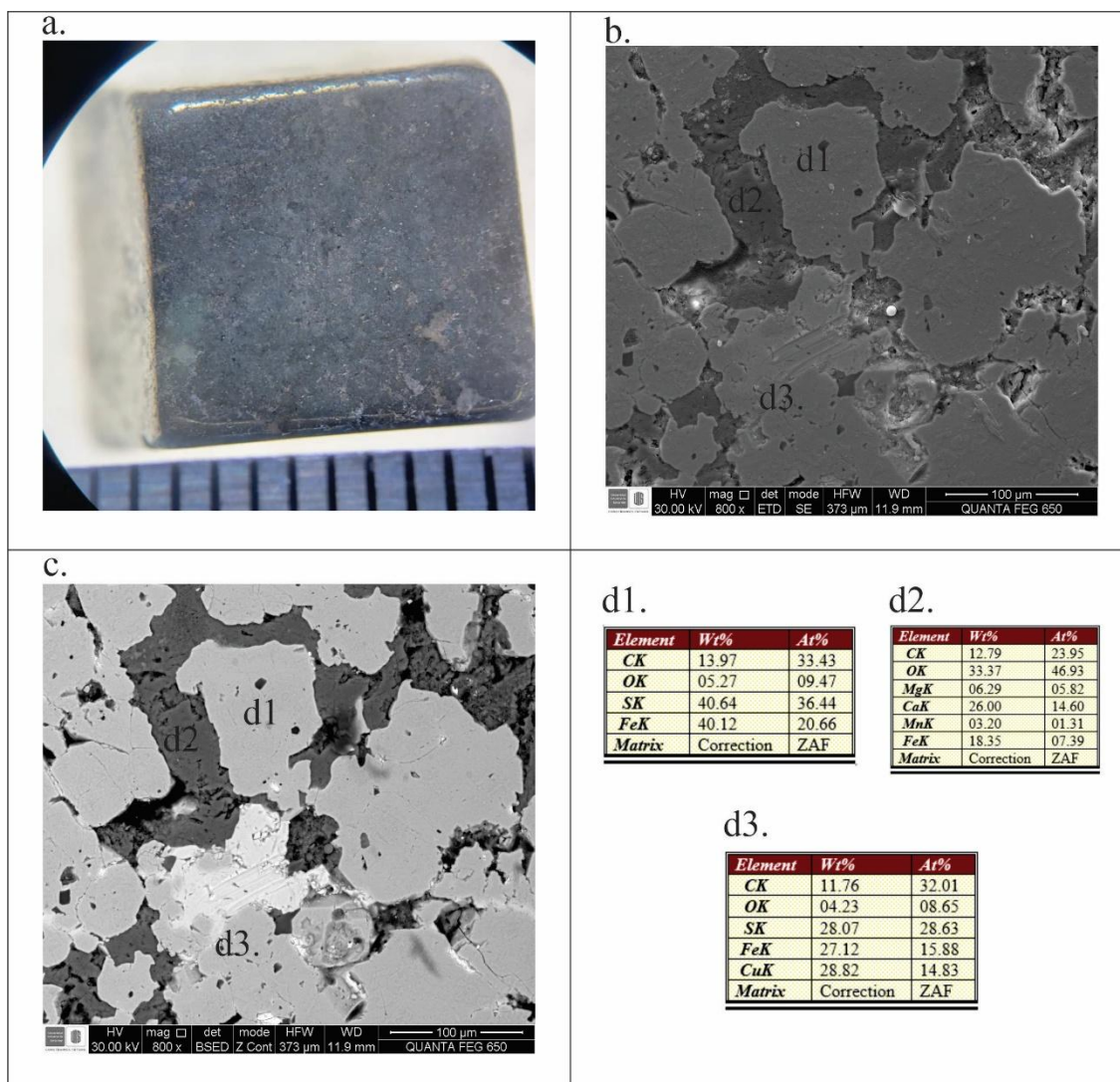
Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. C. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Sulfosal de cobre y arsénico. d2. Matriz carbonatada. d3. Pirita

Se identificó la presencia de sulfosales ricas en cobre, arsénico y antimonio, las cuales presentan mayor brillo en imágenes de electrones retrodispersados en comparación con la pirita y bajos contenidos de oxígeno. Asimismo, se observó carbonato de calcio relleno en las cavidades en la superficie del cristal. La pirita se presenta bien preservada, sin evidencias de oxidación (Figura 38).

4.4.3 Testigo Columna Black Diamond no oxidada

Figura 39

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la Black Diamond no oxidada



Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. c. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Pirita (FeS_2). d2. Matriz carbonatada. d3. Calcopirita

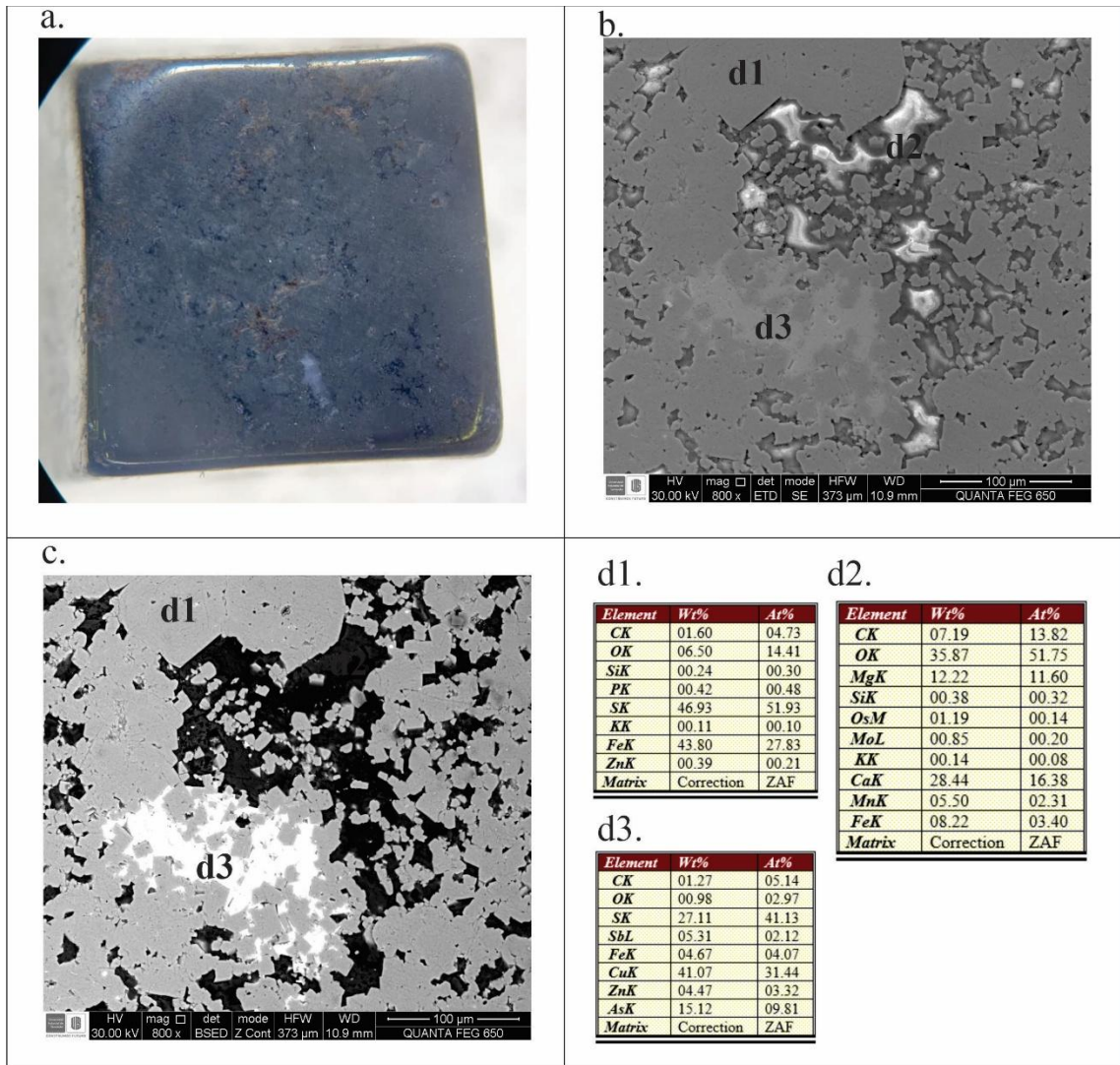
Se observa pirita bien preservada, con baja presencia de oxígeno, lo que indica ausencia de oxidación significativa. Presenta superficies lisas y sin evidencia de porosidad secundaria ni

textura carcomida. Asimismo, se identifica un mineral cálcico relleno de grietas. Finalmente, se observa la presencia de un sulfuro de cobre con bajos contenidos de oxígeno (Figura 39).

4.4.4 Testigo Columna Mezcla no oxidada

Figura 40

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna mezcla no oxidada



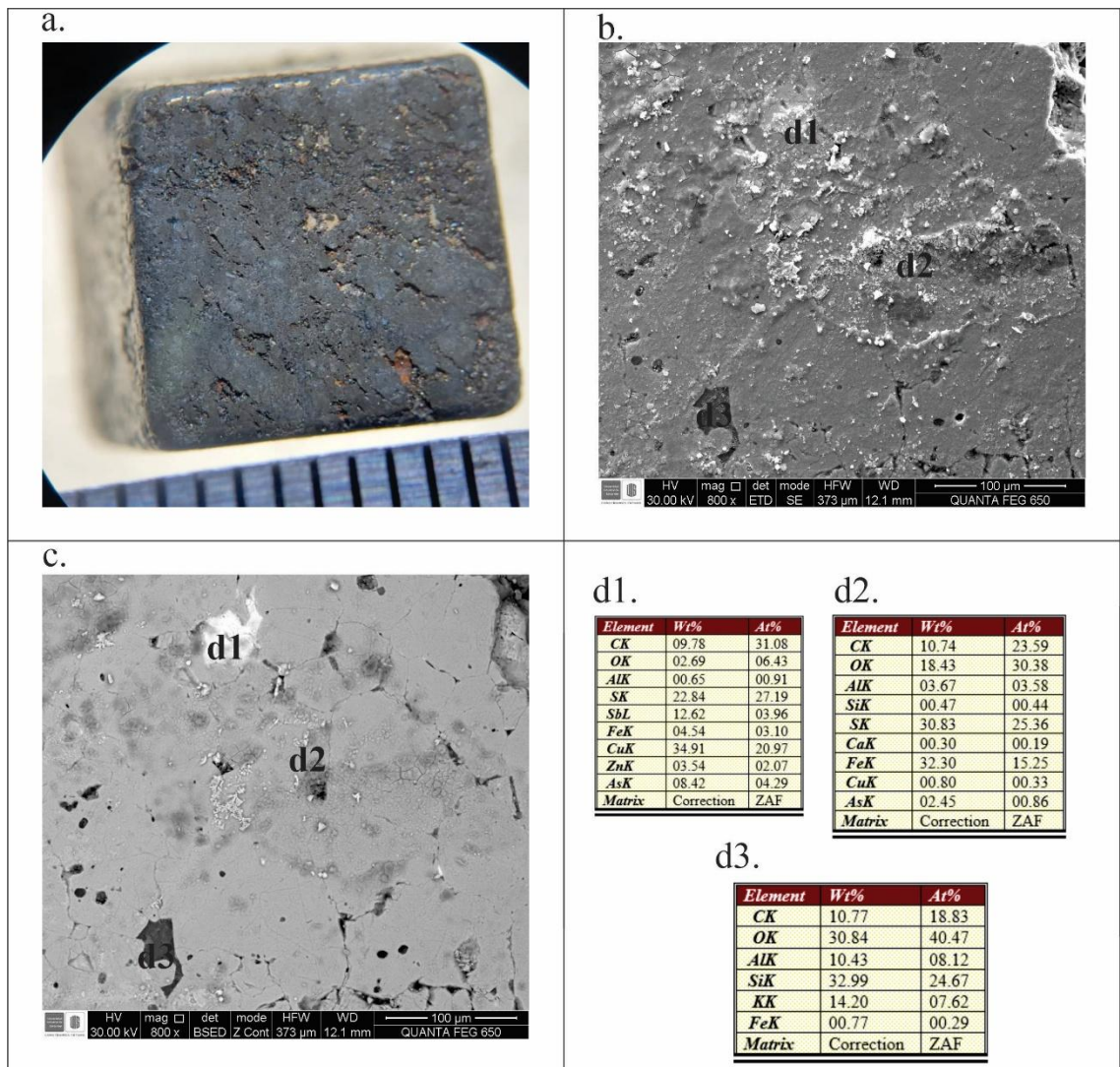
Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. c. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Pirita (FeS_2). d2. Mineral carbonatado. d3. Sulfosal de cobre y arsénico.

Se observó pirita morfológicamente bien preservada. Asimismo, se identificaron carbonatos precipitados en las grietas del mineral. Finalmente, se evidenció la presencia de sulfosales ricas en cobre y arsénico, junto con elementos traza como zinc y antimonio (Figura 40).

4.4.5 Testigo Columna Control Oxidada

Figura 41

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna control oxidada



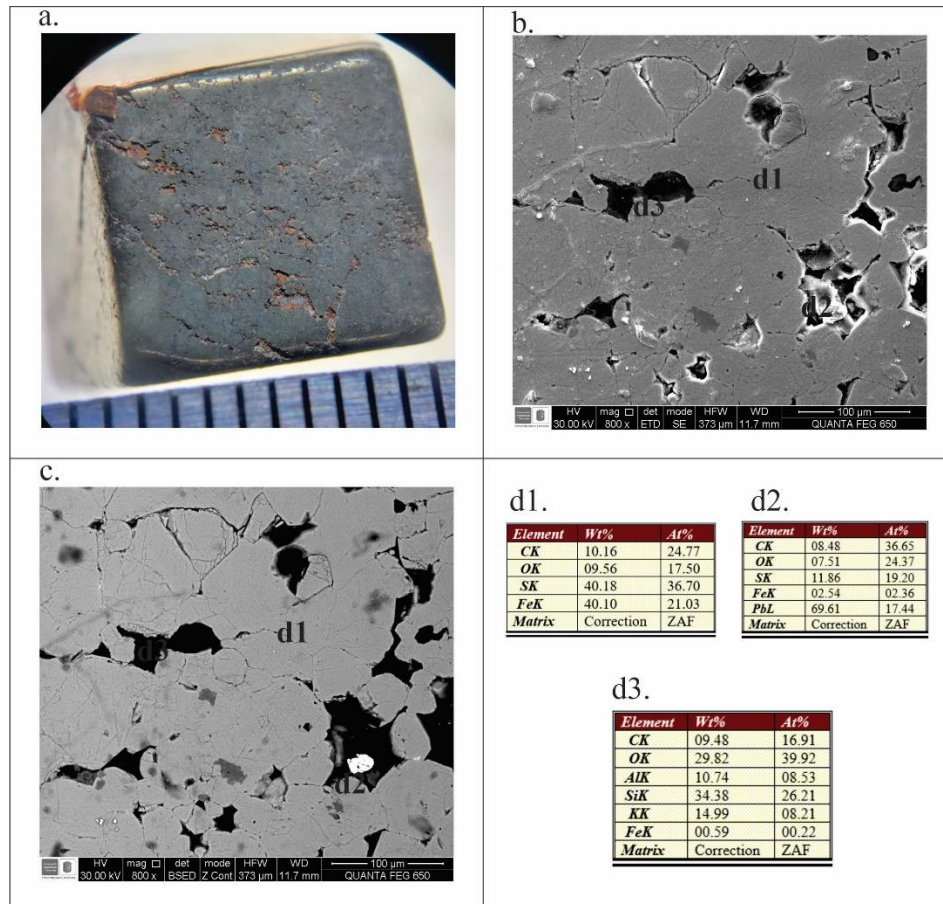
Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. c. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Calcopirita alterada (CuFeS_2). d2. Pirita oxidada (FeS_2). d3. Silicato.

Se identificó una fase rica en cobre, posiblemente calcopirita, con presencia de impurezas de antimonio, zinc y arsénico. Asimismo, se observó pirita altamente oxidada, caracterizada por una textura rugosa y la presencia de microprecipitados sobre toda la superficie del cubo (Figura 41).

4.4.6 Testigo Columna Black Diamond oxidada

Figura 42

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna Black Diamond oxidada



Nota. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. Microscopía electrónica de barrido (SEM) en electrones secundarios. C. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Pirita (FeS_2). d2. Sulfato de plomo (PbSO_4). d3. Feldespato potásico (KAlSi_3O_8).

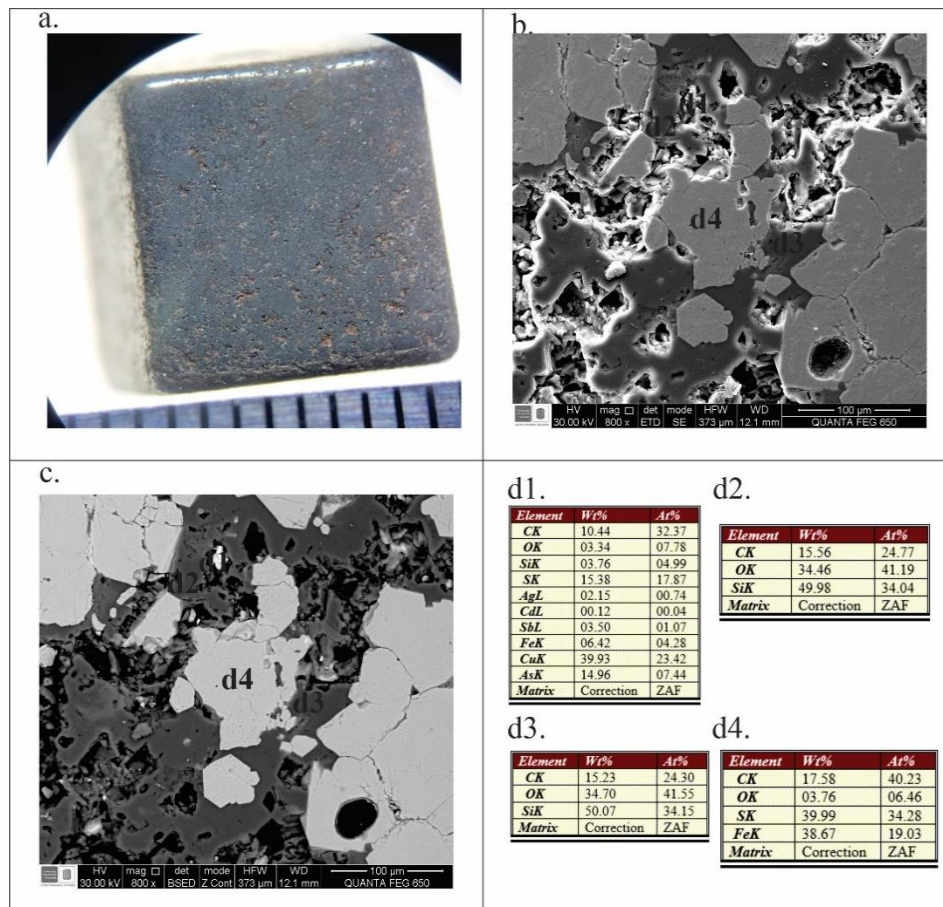
Se identificaron tres fases principales en la muestra analizada. La primera corresponde a la matriz de pirita, la cual presenta una morfología agrietada.

La segunda fase corresponde a sulfato de plomo, cuya formación se asocia a la alteración de un sulfuro primario, probablemente galena. Esta fase se observa relleno de cavidades, lo que indica que la galena original pudo haber sido obtenida del mismo relave. Finalmente, la tercera fase corresponde a un silicato, posiblemente feldespato potásico (Figura 42).

4.4.7 Testigo Columna SM6 oxidada

Figura 43

Análisis SEM del testigo de pirita presente en la columna SM6 oxidada



Nota. a. Vista general del testigo de pirita retirado de la columna. b. SEM en electrones secundarios. c. SEM en electrones retrodispersados. d. Análisis cuantitativos EDS. d1. Calcopirita con impurezas (CuFeS₂). d2. Cuarzo. d3. Cuarzo. d4. Pirita (FeS₂).

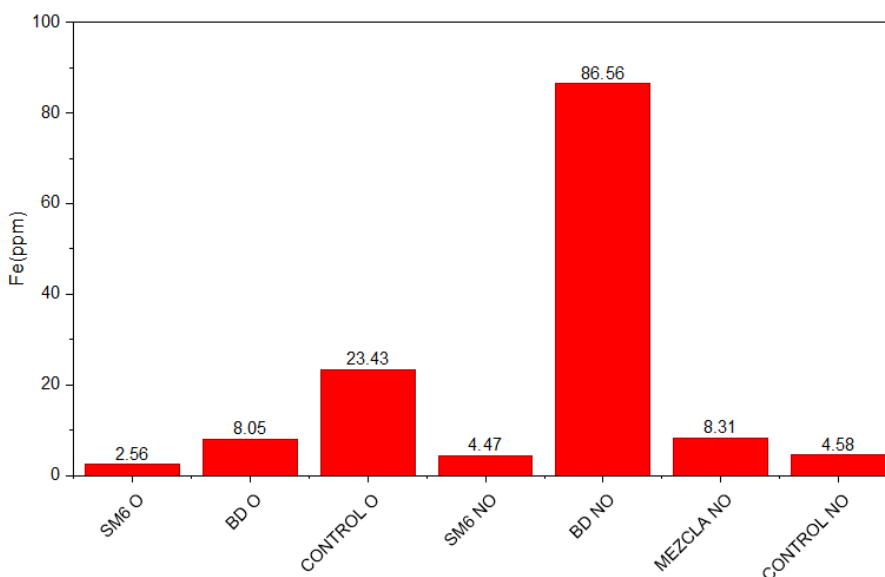
Se observa una morfología alterada, con superficies carcomidas y cavidades rellenas por sulfuros como la calcopirita, la cual contiene impurezas de arsénico. La pirita se encuentra fragmentada (Figura 43).

4.5 Capacidad de intercambio de hierro del relave post meteorización.

El análisis de hierro en los relaves extraídos al final del experimento evidenció que la mayor concentración se presentó en la columna tratada con Black Diamond bajo condiciones no oxidadas. No obstante, excluyendo este caso, la columna de control oxidado registró concentraciones de hierro superiores en comparación con sus contrapartes tratadas con bioestimulantes. Por su parte, las columnas tratadas con SM6 y Black Diamond en condiciones oxidadas mostraron un comportamiento asociado a una posible remediación, reflejado en menores concentraciones relativas de hierro. Sin embargo, en las condiciones no oxidadas, se registró la mayor concentración de hierro en la columna tratada con Black Diamond (Figura 44).

Figura 44

Cantidad de hierro en mg/kg que intercambia el relave en solución



5 Discusión

El análisis del comportamiento del pH fue primordial para evaluar la eficacia de la inhibición de la oxidación de la pirita por medio de una barrera protectora y la posterior generación de drenaje ácido de mina (DAM). Los resultados indican que el tratamiento con Black Diamond en relaves no oxidados proporcionó la mayor estabilidad geoquímica, manteniendo un ambiente neutral con valores de pH entre 6.5 y 7.0, incluso tras el periodo seco; según lo descrito por Tu et al. (2022) los compuestos orgánicos emplean grupos funcionales oxigenados para adherirse a la superficie de la pirita, generando una capa protectora, siendo el ácido húmico (componente principal del Black Diamond) altamente eficaz para recubrir la superficie de la pirita, inhibiendo la oxidación y generación de los DAM.

Por otra parte, el bioestimulante SM6, compuesto por extractos del alga *Ascophyllum nodosum*, las cuales entre sus componentes principales, contiene alginatos, que tienen la capacidad de formar redes de gel en presencia de cationes divalentes como calcio y magnesio, los cuales sellan los poros del relave, impidiendo el paso de oxígeno hacia la pirita; además, de aportar florotaninos, compuestos con una potente acción antioxidante y antimicrobiana, los cuales inhiben las enzimas de las bacterias hierro y azufre oxidantes, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, reduciendo de forma significativa la catálisis biológica que acelera el proceso de oxidación (Casey et al., 2026). Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados de la acción del SM6 en relaves no oxidados mostraron un comportamiento irregular pero satisfactorio, ya que oscilaron entre pH 7.5 a 5 durante el periodo lluvioso simulado, alcanzando una estabilización en un rango de pH 6.0 a 6.5 después del periodo seco simulado, indicando, que el uso de carbono soluble en forma de SM6 en muestras no oxidadas mostró una mejora significativa respecto al grupo control (pH 5.5 a 6.0).

Inicialmente los resultados concuerdan con lo expuesto por Liu et al. (2024), quienes sostienen que la materia orgánica añadida, en forma de compost, actúa como un material de alcalinidad intrínseca capaz de neutralizar la acidez de la solución, lo que mitiga de manera directa la tasa de oxidación de la pirita.

En lo que respecta a los relaves oxidados, el tratamiento con Black Diamond mostró un descenso gradual del pH desde 6.5 hasta 5.8; no obstante, después del periodo seco, se registró una caída abrupta a 4.0. Este comportamiento podría explicarse por la actividad de las bacterias hierro y azufre oxidantes, estas bacterias son responsables de la aceleración del proceso de oxidación de la pirita, al obtener energía mediante la oxidación (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}) en ambientes ácidos (Aduvire, 2006). A pesar de la alta resistencia de las barreras orgánicas de ácidos húmicos en la superficie de la pirita, estudios de Yang et al. (2018) señalan que las bacterias hierro y azufre oxidantes poseen la capacidad de colonizar y degradar las capas de ácido húmico, reactivando la oxidación de la pirita, esto podría sugerir que hacia el final del experimento estas bacterias lograron destruir la barrera protectora de Black Diamond, promoviendo la generación de drenajes ácidos, sin embargo, para aseverar este tipo de procesos sería necesario realizar estudios microbiológicos, los cuales estaban fuera del alcance del presente estudio.

Por su parte, el SM6 en el relave oxidado presentó fluctuaciones irregulares con picos entre 6.5 y 5.0, logrando una estabilización en 5.3 tras el periodo de sequía. Este agotamiento se relaciona con lo reportado por Peng et al. (2025), en investigaciones similares con biochar de algas, la estabilidad del pH en los lixiviados es altamente dependiente de la concentración inicial del producto, concentraciones insuficientes permiten un aumento inicial del pH seguido de un descenso continuo, lo que sugiere un agotamiento de la capacidad de neutralización, al no alcanzar el umbral crítico necesario para contrarrestar la acidez.

A pesar de las irregularidades, ambos tratamientos representaron una mejora notoria frente a la columna de control oxidada registrando en el periodo lluvioso pH de 4 - 3.5, y alcanzando su máximo nivel de acidez tras el periodo seco con un pH de 2.9. Este decaimiento general del pH de las columnas después del periodo seco concuerda con lo planteado por Aduvire (2006), quien sostiene que la exposición al aire en presencia de humedad residual es más eficiente para la oxidación de la pirita que una precipitación abundante, debido a que el oxígeno y el incremento de la temperatura durante la sequía aceleran las reacciones. En consecuencia, la humedad residual y la aireación durante el periodo seco intensificaron la oxidación, la cual arrastró mayor acidez hacia los lixiviados, al reanudarse los riegos después del periodo de sequedad.

Respecto a la columna de mezcla, al comienzo se vio poco control de la acidez, sin embargo, tras el periodo seco se registraron picos de pH inusualmente altos (8 y 7.6). Este comportamiento podría representar una posible sinergia, en donde el Black Diamond establece una barrera protectora con ácido húmico sobre la pirita del relave, mientras que los florotaninos del SM6 protegen dicha barrera evitando la proliferación de las bacterias hierro y azufre oxidantes mediante sus compuestos bactericidas; no obstante, estos picos se presentaron de forma irregular hacia el final del experimento, se necesitaría un periodo de tiempo más prolongado para confirmar la sostenibilidad de esta protección.

En el análisis de la conductividad eléctrica, se observó que los lixiviados tratados con Black Diamond mantuvieron niveles bajos y constantes, fluctuando entre 3000 y 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el caso del SM6, es importante considerar que la ficha técnica del fabricante especifica que el producto posee una conductividad eléctrica intrínseca elevada, aproximadamente de 26930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (26.93 dS/m). Por lo tanto, los altos valores registrados en sus lixiviados no indican necesariamente una falla en la inhibición del mineral, sino que derivan de la incorporación de los lixiviados de la

columna de los constituyentes propios del producto. Sin embargo, ambos resultados constituyen factores críticos para la gestión ambiental, dado que una conductividad excesiva puede restringir el vertido de estas aguas según los estándares de calidad, los cuales recomiendan valores de hasta $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ para agua de consumo humano en Colombia. (Ministerio de la Protección Social [MinProtección] & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT], 2007).

La baja conductividad en los sistemas de control debe interpretarse con cautela, y que no necesariamente significa que la pirita no se esté oxidando, sino que los metales liberados están precipitando como óxidos e hidróxidos, dentro de la propia columna, los cuales tienen muy poca solubilidad en el lixiviado (Aduvire, 2006).

Los resultados de la concentración de hierro en los lixiviados se vieron afectados por la carga mineral intrínseca de los tratamientos aplicados. De acuerdo con las caracterizaciones de los productos, el Black Diamond aportó una carga inicial significativa de 2731 ppm de hierro, mientras que el SM6 presentó un contenido considerablemente menor de 53 ppm.

Por otro lado, la columna de control se mantuvo en niveles mínimos durante las primeras 12 semanas, para luego presentar un incremento notable en la última fase del experimento, específicamente en la columna oxidada. Estos resultados son consistentes con lo reportado por diversos autores, como Aduvire (2006) y Zamora Echenique y Meza Duman (2022), quienes señalan que los relaves pueden presentar un periodo de latencia antes de evidenciar una lixiviación significativa de metales. En el control oxidado, a pesar de que el pH se mantuvo en condiciones ácidas (4,0 - 3,5), la reserva alcalina en la ganga del relave y los testigos de pirita favoreció la precipitación del hierro liberado en forma de hidróxido férrico [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], un compuesto que resulta muy poco soluble.

Sin embargo, cuando el pH descendió a valores inferiores a 3,5, después del periodo seco, se dio el paso de fase solida a soluto, facilitando el transporte del hierro en el lixiviado de la columna. Esto nos permite recalcar la importancia de hacer la experimentación durante un periodo más prolongado, por lo que se plantea como una opción a considerar en futuros proyectos de investigación que se sigan en esta temática.

La efectividad de los tratamientos para la inhibición de la oxidación de la pirita se confirmó mediante la observación de las superficies de los testigos de pirita. los resultados del SEM, mostraron que el testigo de control oxidado presentó un desgaste notable caracterizado por texturas de corrosión profunda y disolución mineral, dichas morfologías concuerdan con las descritas por Zapata Aguirre et al. (2008) y Liu et al. (2003), quienes identifican la formación de "golfos" y "pits" (microcráteres) de corrosión, acompañados de precipitados de fases secundarias, como indicadores de una oxidación intensa. Por el contrario, las superficies de los cubos tratados con SM6 y Black Diamond se observaron considerablemente más preservadas, con caras lisas, bordes definidos y poca textura de corrosión, siendo esto evidencia circunstancial de que estos productos actuaron como inhibidores de la oxidación de las fases piríticas del relave.

Además, el análisis EDS resaltó picos de oxígeno significativamente menores en las columnas tratadas, tanto en las no oxidadas, como en las oxidadas, en comparación con el control oxidado, lo cual ratifica la formación de una barrera física exitosa que limitó la interacción del mineral con el medio oxidante; por otra parte, al observar los resultados de los testigo iniciales, se identificó la presencia de minerales carbonatados rellenando fracturas preexistentes del mineral, confirmando la disponibilidad de una reserva de alcalinidad intrínseca en los cubos testigo, cuando se comparó con los testigos de las columnas al final del experimento, las columnas no oxidadas aún mostraban presencia de estos minerales carbonatados; por el contrario, en los testigos de las

columnas oxidadas, se observó una ausencia de estas fases, siendo coherente con lo mencionado anteriormente sobre el agotamiento de la capacidad neutralizadora natural del relave.

La observación mediante lupa estereoscópica reveló que los testigos oxidados desarrollaron pátinas rojizas de óxidos de hierro, siendo el control oxidado el que presentó una degradación mayor con superficies visiblemente corroídas. A diferencia, los cubos no oxidados mostraron poca oxidación y corrosión superficial, aunque el testigo de control de este grupo mostro una acumulación de óxidos mayor a la de los otros 3 cubos tratados.

El análisis de la capacidad de intercambio de hierro al finalizar el experimento revelo que el material de la columna de Black Diamond no oxidada registró los niveles más altos de hierro intercambiable en solución (88 ppm), lo cual se atribuye a la elevada concentración de este metal en el bioestimulante (2731 ppm). En contraste, su contraparte oxidada obtuvo valores inferiores (7 ppm). Esta diferencia puede deberse al consumo del producto por parte de la actividad bacteriana y la lixiviación de los componentes del bioestimulante, indicando una correlación directa con la caída del pH observada hacia el final del experimento en dicha columna, confirmando la pérdida de la barrera protectora.

Por su parte, el control oxidado se vio como la columna con mayor liberación de hierro hacia el lixiviado (23 ppm), En comparación, el tratamiento con SM6 mostró los resultados más favorables en términos de movilidad, con valores de 2.56 ppm para la muestra oxidada y 4.4 ppm para la no oxidada. Aunque cerca, estos números no alcanzan a los valores óptimos propuestos por El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2015), a través de la Resolución 0631 para el vertido de aguas relacionado con la minería de oro, valor que debe ser de 2 ppm.

En conjunto, los resultados permiten concluir que ambos remediadores tuvieron un desempeño favorable respecto a la inhibición de la oxidación de la pirita, preservando la integridad

física del mineral hacia el final del experimento. Si bien ambos tratamientos lograron estabilizar el pH, incluso después de los periodos secos, etapa donde la oxidación suele ser más intensa y generar mayor acidez, se identificaron algunas condiciones desfavorables en su aplicación como agente mitigante de la formación de DAM.

Aunque se controló eficazmente la acidez del drenaje, la composición de los productos influyó negativamente en otros parámetros de calidad de los lixiviados que no pueden ser ignorados en una gestión ambiental. Por un lado, el Black Diamond aportó una carga considerable de hierro al sistema, mientras que la elevada salinidad del extracto de algas marinas (SM6) incrementó la conductividad eléctrica de los lixiviados.

Asimismo, se identificaron puntos débiles en la eficacia de los productos con el paso del tiempo. La degradación de la membrana de ácido húmico (Black Diamond) por la eventual actividad metabólica de las bacterias hierro y azufre oxidantes presentes en los relaves, sumada al agotamiento progresivo de la capacidad de neutralización del SM6, impactan en la sostenibilidad del tratamiento a largo plazo.

No obstante, la evidencia física en los testigos de pirita tanto en relaves oxidados como no oxidados confirmó una preservación superior del mineral al ser tratados con ambos remediadores, ratificando su potencial como agentes de protección superficial frente a la oxidación del mineral. Como ya se indicó, no obstante, se recomienda realizar este tipo de pruebas por tiempos de meteorización más largos, a los fines de extraer conclusiones más sólidas acerca del desempeño de los dos agentes orgánicos estudiados.

6 Conclusiones

Ambos productos remediadores, Black Diamond y SM6, demostraron una alta eficacia en la inhibición de la oxidación de la pirita, esto se evidenció en la preservación superficial de los testigos de pirita observada en el SEM y en los picos de oxígeno asociados a la pirita. En contraste, con las muestras control presentaron un mayor grado de afectación, lo que confirma la efectividad de los tratamientos.

El periodo seco fue determinante en la intensificación de la oxidación de la pirita, provocando descensos significativos del pH en todas las columnas, lo que confirma que la aireación y la humedad residual favorecen la oxidación de la pirita y posterior generación de drenaje ácido de mina.

En cuanto a la remediación de los drenajes ácidos, se obtuvieron buenos resultados en términos de pH, logrando la neutralización de los drenajes. Sin embargo, las características intrínsecas de ambos productos influyeron negativamente en otros parámetros de calidad de los lixiviados que no pueden ser ignorados en la gestión ambiental. Por otra parte, es importante tener en cuenta que la eficiencia de los productos disminuye a lo largo del tiempo.

El SM6 presentó un mejor desempeño a lo largo del tiempo; si bien se observó un decaimiento después del periodo seco, logró alcanzar una estabilidad geoquímica y mantener el pH por encima de los niveles críticos, incluso en las columnas oxidadas.

Una mezcla de ambos productos puede ser efectiva a largo plazo, pero deben realizarse pruebas en un periodo de tiempo más extenso para corroborar la sinergia entre los dos componentes.

En conjunto, los resultados confirman que ambos productos tienen potencial como agentes de remediación para el control de la oxidación de la pirita, pero su sostenibilidad a largo plazo depende de factores como la actividad microbiana y la dosificación.

Referencias Bibliográficas

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina: generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España.
- American Society for Testing and Materials. (2021). Standard Test Method for Column Percolation Extraction of Mine Rock by the Meteoric Water Mobility Procedure [Método de prueba estándar para la extracción por percolación en columna de roca de mina mediante el procedimiento de movilidad del agua meteórica] (ASTM E2242-21). <https://store.astm.org/e2242-21.html>
- Beltrán-Rodríguez, L. N., Larrahondo, J. M., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (44), 5–20.
- Carrasco, O. H. (2016). Concentración gravimétrica de menas auríferas. *Revista Metalúrgica*, (38), 38–50. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rmuto/n38/n38_a06.pdf
- Casey, A., Boland, T. M., Kelly, A. K., McKay, Z. C., Markiewicz-Keszycka, M., Mirzapour-Koudash, A., Lynch, M. B., & Vigers, S. (2026). Evaluation of *Ascophyllum nodosum* extract supplementation on feed degradability, ruminal fermentation and methane production using the rumen simulation technique (RUSITEC). *PLOS ONE*, 21(3), Article e0344019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0344019>
- Chengren, W., Guihong, H., & Kuangdi, X. (2023). Mineral processing product yield. En K. Xu (Ed.), *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_528-1
- Colegio Oficial de Agrónomos de Levante. (2018). El mar y la agricultura, cada día más cerca: Así funcionan los extractos de algas procedentes de *Ascophyllum nodosum* y *Ecklonia maxima*. Coial.

<https://www.coial.org/partners-coial-el-mar-y-la-agricultura-cada-dia-mas-cerca-asi-funcionan-los-extractos-de-algas-procedentes-de-ascophyllum-nodosum-y-ecklonia-maxima/>

Elorza, E. (2020). Concentración gravimétrica. Academia.edu.

https://www.academia.edu/44541749/CONCENTRACION_GRAVIMETRICA

Escalante, J. B. E., & Dávila, D. F. L. (2023). Geometalurgia aplicada a relaves auríferos cianurados en la región Arequipa y su posterior proceso por Gravimetría. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), Article e24132.

Galoso Carrasco, A., Loaiza Choque, E., & Zárate Olazabal, H. (2008). Mineralización y explotación minera artesanal en la Costa Sur Media del Perú (Boletín Serie E: Minería No. 4). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/281>

Gupta, A. y Yan, D. S. (2006). *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction* (pp. 494-554). Elsevier.

Huang, J., Li, X., Yang, J., Wang, X., Zhou, Y., Liu, B., & Zhang, Y. (2025). Study on the Oxidation Inhibition of Pyrite by 2-Mercaptobenzimidazole in the Presence of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals*, 15(5), 487.

Liu, H. L., Chen, B. Y., Lan, Y. W., & Cheng, Y. C. (2003). SEM and AFM images of pyrite surfaces after bioleaching by the indigenous *Thiobacillus thiooxidans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62(4), 414–420.

Liu, W., Sayem, A. K., Perez, J. P., Hornback, S., Owusu-Fordjour, E. Y., & Yang, X. (2024). Mechanism investigation of food waste compost as a source of passivation agents for inhibiting pyrite

oxidation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), Article 113465.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113465>

Ma, M., Wang, W., Zhang, K., & Shi, Z. (2023). Experimental study on the oxidation reaction of coal-pyrite and mineral-pyrite with the participation of Fe (III) and bacteria under acidic conditions. *Energies*, 16(8), 3588. <https://doi.org/10.3390/en16083588>

Manrique Gálvez, M. d. C., & Agurto Cornejo, A. (2022). Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga–La Libertad (Boletín Serie B: Geología Económica No. 78). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Colombia. Ministerio de la Protección Social, & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007, 22 de junio). Resolución 2115 de 2007. Por la cual se señalan características, instrumentos de control y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. *Diario Oficial* No. 46.673.
https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, 17 de marzo). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. *Diario Oficial* No. 49.457. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Narpes Colombia S.A.S. (2016). Black Diamond [Ficha técnica]. <http://narpes.com.co/docs/ficha-tecnica.pdf>

- Ortiz, A. A., Jara, P. A. N., Rojas, V. S. A., Delgado, E. F. L., Lavado, L. J. Q., Sandoval, M. C., & Guizado, J. N. A. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 12(24), 49–55.
- Palyanova, G. A., Sazonov, A. M., Zhuravkova, T. V., & Silyanov, S. A. (2019). Composition of pyrrhotite as an indicator of gold ore formation conditions at the Sovetskoe deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 60(7), 735–751.
- Pamo, E. L., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Bol. Geol. y Min*, 113(1), 3-21.
- Peng, Z., Liu, C., Fu, Y., Liu, H., Liu, H., & Cao, H. (2025). Utilization of algal biochar for biopassivation of copper sulfide tailings to reduce acid mine drainage. *Biology*, 14(3), Article 300. <https://doi.org/10.3390/biology14030300>
- Plymag. (2020). Ficha técnica: SM6 [Ficha técnica]. Naturezza. https://www.naturezza.com.co/index.php?controller=attachment&id_attachment=297
- Plymag. (2023). SM6 - PlyMag [Folleto]. https://plymag.com/wp-content/uploads/2023/03/SM6%C2%AE_Folleto__SPA.pdf
- Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q. M., Ho, S. H., Ren, N. Q., & Show, P. L. (2020). Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2, Artículo 100024. <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100024>
- Romero, A. A., & Flores, S. L. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 75-82.

- Sanchez Rial, J. E., & Ferreira Centeno, J. P. (2016). Drenajes ácidos de mina: Alternativas de tratamiento. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 1(1), 20–33. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522016000100003&lang=es
- Sarker, S. K., Pownceby, M. I., Bruckard, W., Haque, N., Bhuiyan, M., & Pramanik, B. K. (2023). Unlocking the potential of sulphide tailings: A comprehensive characterization study for critical mineral recovery. *Chemosphere*, 328, Article 138582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138582>
- Tu, Z., Wu, Q., He, H., Zhou, S., Liu, J., He, H., Sun, J., & Reinfelder, J. R. (2022). Reduction of acid mine drainage by passivation of pyrite surfaces: A review. *Science of the Total Environment*, 832, Article 155116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155116>
- Vásquez Ochoa, O. Y. (2016). Evaluación de un biorreactor pasivo durante la remediación de drenajes ácidos de mina del distrito minero de Zipaquirá (Colombia) [Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Javeriana].
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology* (8.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Yang, H., Luo, W., & Gao, Y. (2018). Effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on humic-acid passivation layer on pyrite surface. *Minerals*, 8(10), Article 422. <https://doi.org/10.3390/min8100422>
- Zamora Echenique, G., & Meza Duman, R. (2022). Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 7(1), 3-20.

Zapata Aguirre, D. I., Ossa Henao, D. I., & Márquez Godoy, M. A. (2008). Caracterización mineralógica de los productos de oxidación del sistema pirita-esfalerita por bacterias nativas oxidantes de Fe. *Dyna*, 75(154), 59–64.