

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Eficacia de agentes modificadores en la prevención de la oxidación de pirita y migración de metales en relaves con cianuro y mercurio.

Juan Sebastián Delgadillo Neira y Kevin Geovanny Latorre Díaz

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Geólogo

Director

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2026

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado primeramente a Dios creador y omnipresente, por brindarme la sapiencia, seguridad y fortaleza en cada uno de los pasos que di y sigo dando para llegar a donde estoy.

A mi madre Olga, quien ha sido mi motor y mi referencia en la vida, la cual siempre me ha apoyado, dándome su amor incondicional, permitiéndome convertirme en lo que soy hoy en día. A mi padre Alexander, que, aunque desde el cielo, siempre lo he sentido a mi vera, protegiéndome y fortaleciéndome para no desfallecer.

A mis nonos paternos y maternos, los cuales han sido una fuente de cariño sin límite, creyendo desde siempre quien soy y en quien me convertiré.

A mi hermano, que desde la distancia siempre ha velado por mi bienestar mostrando su profunda preocupación ante mis dificultades y deseándome el mejor futuro posible.

A mis tíos, especialmente mis tías, las cuales han seguido con prontitud y desinterés mi desarrollo como profesional y como persona, dándome su auxilio ante cualquier inconveniente.

A mis amigos quienes han vuelto amena esta travesía, con sus consejos y apoyo, principalmente, Kevin, quien además fue mi compañero de tesis, el cual ha estado en el escalafón de un hermano estando presente en los momentos de alegría como en momentos más opacos.

A Pedro Delvasto, el director de nuestro trabajo, por haber tenido la paciencia y sobre todo la disposición ante nosotros, permitiendo finalizar con este trabajo tan robusto.

A todos ellos, dedico mi esfuerzo.

Juan Sebastián Delgadillo Neira

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a Dios por ser la luz que me ayudó a superar mis dudas y la fuerza que me sostuvo cuando las cosas se ponían difíciles, sin su ayuda este sueño no sería realidad ahora.

También quiero dedicarla a mis padres, que son los pilares de mi vida que me enseñaron a ser fuerte y a no rendirme, este título es el resultado de sus sacrificios y un ejemplo de su amor. A mi pareja Stefanny, que es mi refugio y mi motivación, me dio paz y la seguridad que necesitaba para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, a mis amigos de la carrera, en especial a Sebastián, que fue como un hermano para mí, compartimos momentos buenos y malos, y juntos hicimos de esta experiencia algo inolvidable.

Kevin Geovanny Latorre Diaz

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por permitirnos concretar esta etapa tan relevante en nuestras vidas, por medio de su apoyo y bendición.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por darnos la oportunidad de estudiar en sus aulas y por ser el escenario de nuestro crecimiento académico y personal.

A los profesores de la carrera, sus enseñanzas, exigencia y pasión por las ciencias de la tierra las cuales han sido clave para nuestra formación profesional.

También quiero agradeceremos a nuestro director de tesis, Pedro Delvasto; su experiencia, paciencia y visión crítica nos ayudaron a superar los desafíos de esta investigación.

Por último y más relevante en nuestras vidas, nuestras familias, amigos y seres cercanos, quien han dibujado su presencia durante nuestra trayectoria, gracias.

Gracias por creer en nosotros.

Kevin y Sebastián

Tabla de contenido

Introducción	14
1 Planteamiento y justificación del problema	15
2 Objetivos	18
2.1 Objetivo general.....	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 Marco teórico.....	19
3.1 Extracción y procesamiento de minerales auríferos	19
3.1.1 Cianuración	20
3.1.2 Amalgamación	21
3.2 Residuos de tipo relave obtenidos del procesamiento de minerales auríferos.....	22
3.3 Generación de un drenaje ácido de mina (DAM).....	23
3.4 Técnicas experimentales para evaluar la formación de drenajes ácidos de mina a partir de relaves.....	26
3.4.1 Test de lixiviación en columnas.....	27
3.5 Métodos para prevenir los drenajes ácidos de mina (DAM)	28
3.6 Inhibidores orgánicos en la oxidación de la pirita	30
3.6.1 BlackDiamond (ácidos húmicos y fúlvicos).....	30
3.6.2 SM6 (Extracto de algas Ascophyllum Nodosum).....	31

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

4 Metodología	32
4.1 Etapa 1 Preparación de las columnas de lixiviación y caracterización del relave	33
4.1.1 Rayos X	40
4.1.2 Microscopía	40
4.2 Etapa 2 Determinación de la cantidad de agua a utilizar en las columnas de lixiviación y análisis del comportamiento fisicoquímico cada semana	41
4.3 Etapa 3 Ensayos de laboratorio en los testigos utilizados y la transferencia de hierro definido en cada relave al finalizar el experimento.....	43
5 Resultados	44
5.1 Caracterización mineral del material utilizado en las columnas.....	44
5.1.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	44
5.1.2 Rayos X	55
5.2 Control de pH y conductividad eléctrica de los lixiviados semanales además de Fe disuelto en las muestras representativas	59
5.3 Evaluación de la modificación superficial de los testigos en cada columna	65
5.4 Presencia de hierro con facilidad de solubilidad en el relave post experimental en función de los tratamientos usados	89
6 Discusión.....	90
7 Conclusiones	100
Referencias bibliográficas.....	102

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Apéndices.....111

Lista de figuras

Figura 1 Esquema básico en planta de una presa y un depósito de relaves	23
Figura 2 Etapas en la formación de aguas ácidas	26
Figura 3 Dispositivo de extracción por percolación en columna.....	28
Figura 4 Fase metodológica llevada a cabo en tres etapas.....	32
Figura 5 Cubos de pirita usados como testigos dentro de cada columna.....	35
Figura 6 Columnas de lixiviación.....	36
Figura 7 Esquema del montaje de las columnas de lixiviación	37
Figura 8 Imágenes MEB del primer sector analizado para el relave no oxidado	46
Figura 9 Imágenes MEB del segundo sector analizado para el relave no oxidado.....	49
Figura 10 Imágenes MEB del primer sector analizado para el relave oxidado	51
Figura 11 Imágenes del MEB del segundo sector analizado para el relave oxidado.....	53
Figura 12 Difractograma obtenido a partir del análisis DRX de una muestra del material adecuado no oxidado.....	56
Figura 13 Difractograma obtenido a partir del análisis DRX de una muestra del material adecuado no oxidado.....	57
Figura 14 Comportamiento semanal del pH y la conductividad eléctrica de las muestras líquidas extraídas de las columnas oxidadas	60
Figura 15 Comportamiento semanal del pH y la conductividad eléctrica de las muestras líquidas extraídas de las columnas no oxidadas	62
Figura 16 Fe presente en los lixiviados de las muestras representativas	64
Figura 17 Cubo sin oxidar usado como blanco de referencia.....	66
Figura 18 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo no oxidado	67

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 19 Cubo testigo presente en la columna NO1	69
Figura 20 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO1	70
Figura 21 Cubo testigo presente en la columna NO2	72
Figura 22 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO2	73
Figura 23 Cubo testigo presente en la columna NO3	75
Figura 24 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO3	76
Figura 25 Cubo testigo presente en la columna NO4	78
Figura 26 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO4	79
Figura 27 Cubo oxidado usado como referencia	81
Figura 28 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo oxidado	82
Figura 29 Cubo testigo presente en la columna O1	84
Figura 30 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna O1	85
Figura 31 Cubo testigo presente en la columna O2	87
Figura 32 Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna O2	88
Figura 33 Valores de Fe soluble en mg/Kg medido en el material solido de las columnas y el relave original	90

Lista de tablas

Tabla 1 Minerales Auríferos/Procesos	20
Tabla 2 Tratamientos realizados en cada columna de lixiviación.....	39
Tabla 3 Definición de el volumen de agua a regar en el experimento	42
Tabla 4 Minerales identificados en el material no oxidado empleando microscopía electrónica de barrido (MEB).....	54
Tabla 5 Minerales identificados en el material oxidado empleando microscopía electrónica de barrido (MEB).....	54
Tabla 6 Cuantificación elemental obtenida a partir del FRX para el material no oxidado	58
Tabla 7 Cuantificación elemental obtenida a partir del FRX para el material oxidado	59
Tabla 8 Relación de Fe/S y oxígeno presente en los cubos usados como referencia a partir de los resultados obtenidos del MEB en el análisis EDS	97
Tabla 9 Relación de Fe/S y oxígeno presente en los cubos usados como testigos de acuerdo a los resultados obtenidos del MEB en el análisis EDS	98

Lista de apéndices

Apéndice A Lectura del pH en la solución de peróxido de hidrogeno y agua	111
Apéndice B Lectura final del pH al mezclar el relave con la solución de peróxido de hidrogeno y agua.....	112
Apéndice C Calibración del equipo de medición portátil de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine HI981	113
Apéndice D Masa medida del relave post experimental y posterior uso del agitador al mezclarlo con agua destilada para llevarlo al análisis de la facilidad de solubilidad del hierro en el material	114
Apéndice E Uso del ácido HCl para la digestión de las muestras de hierro y posterior filtrado .	115
Apéndice F Uso del horno para el secado de las muestras solidas	116
Apéndice G Cubos de pirita testigo de cada columna de lixiviación post experimental	117

Resumen

Título: Eficacia de agentes modificadores en la prevención de la oxidación de pirita y migración de metales en relaves con cianuro y mercurio*

Autores: Kevin Geovanny Latorre Diaz, Juan Sebastián Delgadillo Neira**

Palabras Clave: Pirita, Drenaje ácido de mina (DAM), Columnas de lixiviación, Hierro, BlackDiamond, SM6, Relave

Descripción:

Esta investigación tuvo como objetivo la evaluación del BlackDiamond y el SM6 (aditivos orgánicos) como inhibidores a la tendencia de oxidación de la pirita en un relave de origen aurífero procedente del sur de Bolívar, el cual fue debidamente caracterizado mediante técnicas analíticas de rayos x y microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se emplearon seis columnas de lixiviación, las cuales fueron regadas, monitoreando pH, conductividad eléctrica y concentraciones de hierro en los lixiviados durante 12 semanas. Además, al finalizar el experimento, fueron analizados mediante MEB, seis cubos de pirita procedentes de cada columna, los cuales funcionaron como testigos. Los resultados arrojaron que el uso del BlackDiamond y el SM6, permitieron evitar en cierto grado la oxidación de la pirita, esto reflejado en el equilibrio y aumento de los valores de pH, el control de la disolución del hierro en lixiviados como en el relave y la poca afectación en las superficies de los testigos, evitando así la continua acidificación y por ende generación de un drenaje ácido de mina.

Este trabajo permitió concluir la efectividad del uso de los aditivos mencionados, además, de dar una visión más clara de su uso para mejorar la capacidad de inhibición de la oxidación de la pirita.

* Trabajo de Grado

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

Abstract

Title: Effectiveness of modifying agents in preventing pyrite oxidation and metal migration in tailings containing cyanide and mercury *

Authors: Kevin Geovanny Latorre Diaz, Juan Sebastián Delgadillo Neira**

Key Words: Pyrite, Mine acid drainage (MAD), Leaching columns, Iron, BlackDiamond, SM6, Tailings

Description:

The objective of this study was to evaluate BlackDiamond and SM6 (organic additives) as inhibitors of pyrite oxidation in a gold-bearing tailings stream from southern Bolívar, which was thoroughly characterized using X-ray analytical techniques and scanning electron microscopy (SEM).

Six leaching columns were used; these were leached while monitoring pH, electrical conductivity, and iron concentrations in the leachates over a 12-week period. Additionally, at the end of the experiment, six cubes of pyrite from each column were analyzed by SEM and served as controls. The results showed that the use of BlackDiamond and SM6 helped prevent pyrite oxidation to a certain extent, as reflected in the stabilization and increase in pH values, the control of iron dissolution in both leachates and tailings, and the minimal impact on the surfaces of the control samples, thereby preventing continued acidification and, consequently, the generation of acid mine drainage.

This study confirmed the effectiveness of the aforementioned additives and provided a clearer understanding of their use in enhancing the inhibition of pyrite oxidation.

* Bachelor Thesis

** School of Physicochemical Engineering. School of Geology. Pedro Luis Delvasto Angarita. Ph.D. in Materials Science and Technology

Introducción

La extracción de recursos minerales y su posterior procesamiento genera grandes volúmenes de residuos, incluidos relaves de molienda, roca estéril, desechos de refinera, plataformas de lixiviación en pilas y escoria (Nordstrom et al., 2015). Actualmente estos residuos se manejan confinándolos en áreas llamadas lagunas de colas, relaveras o depósitos de relaves (Quintero y Diaz, 2020). Estos depósitos pasan por un proceso de gestión del riesgo de carácter técnico, ambiental y social que es incorporado a cada una de las etapas del ciclo de vida de las presas de relaves, aunque, como toda obra estructural, la posibilidad de ruptura de estas estructuras es latente pudiendo ocasionar consecuencias económicas y ambientales devastadoras para poblaciones aledañas a cursos de agua, aguas abajo; esto debido principalmente a la generación de Drenajes Ácidos de Mina (DAM), debido a la oxidación de minerales sulfurados (ocasionalmente pirita, sulfuro de hierro), los cuales pueden tener diversos grados de toxicidad para el hombre, la fauna y la vegetación debido a su bajo pH, metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles (ATG Ltda., 2020; Aduvire, 2006).

Concretamente, para este trabajo de investigación serán utilizados relaves provenientes de minería aurífera, que han sido procesados utilizando mercurio y cianuro. Estos agregados en altas concentraciones representan un riesgo al poder ser movilizados tras la generación de un DAM, ocasionando así afectaciones a la actividad biológica, tras contaminación de cursos de aguas. Si bien existen métodos activos y pasivos para el tratamiento de un drenaje ácido, Nordstrom et al. (2015) hace alusión a que los procesos de prevención del DAM son una mejor alternativa ambiental. Por ende, se realizará una fase de recopilación bibliográfica y posteriormente experimental, en la que los relaves serán caracterizados y luego, mediante el uso de columnas de lixiviación o meteorización siguiendo la norma ASTM E2242-21, serán evaluados agentes

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

modificadores de características orgánicas que impidan la oxidación de la pirita. Los lixiviados resultantes se analizarán teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos y disolución de metales representados en la caracterización geoquímica dispuesta en el documento, “Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA en proyectos de explotación minera”, por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) teniendo como referencia el Decreto 1076 de 2015 del Sector Ambiente y Desarrollo.

1 Planteamiento y justificación del problema

En Colombia existen tres tipos de minería aurífera: la artesanal, que suele ser desarrollada por grupos étnicos y personas de bajos recursos, la mediana “usualmente ejecutada por empresas en proceso de formalización o recientemente formalizadas” y la que se realiza a gran escala por parte de empresas multinacionales (Sepulveda y Casallas, 2023). Desde el 2001, se han venido implementando una serie de normativas, las cuales tienen como objeto que los pequeños mineros se legalicen con la intención de evitar los altos costos ambientales y, así lograr parar o reducir la contaminación por mercurio (Sepulveda y Casallas, 2023).

Existen procesos tanto físicos como químicos, para la extracción de oro, a partir de minerales auríferos. Desde el punto de vista químico, la cianuración y la amalgamación con mercurio generan buenos rendimientos, pero, a su vez, un importante daño ambiental. Si bien en la actualidad Colombia prohíbe por ley el uso de mercurio en la minería aurífera, como lo dice el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Artículo 3° de la Ley 1658 de 2013, “Erradíquese el uso del mercurio en todo el territorio nacional, en todos los procesos industriales y productivos en un plazo no mayor a diez (10) años y para la minería en un plazo máximo de cinco (5) años. El Gobierno Nacional dispondrá de todos los instrumentos tecnológicos y las

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

respectivas decisiones con los entes y organizaciones responsables del ambiente y el desarrollo sostenible.”, en el país se registra la existencia de depósitos de desechos mineros que contienen mercurio, debido a esta clase de prácticas.

Cartagena (2019) describe la amalgamación como un proceso en el que se agrega mercurio (azogue) al material explotado o procesado. Cuando el mercurio entra en contacto con el oro libre lo atrapa, formando la amalgama (aleación oro – mercurio) de color blanco brillante y viscosa.

A su vez, para recuperar el oro presente en otras fracciones del mineral se puede emplear un proceso de disolución de metales denominado lixiviación. El cianuro de sodio se disuelve en agua, donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina "solución cargada". Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o "estéril" puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos. (Paniagua, 2006). Estos procesos generan relaves con altas concentraciones de cianuro y mercurio los cuales presentan un riesgo ambiental significativo debido al potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM).

Aduvire (2006) explica que estos relaves a menudo contienen minerales sulfurosos residuales, como la pirita, que pueden oxidarse cuando se exponen al oxígeno y al agua, lo que lleva a la formación de lixiviados ácidos y la movilización de metales pesados como el mercurio y contaminantes como el cianuro. Este DAM puede contaminar tanto las aguas superficiales como las subterráneas, lo que representa una amenaza para los ecosistemas, la salud humana y la infraestructura. Los métodos tradicionales de tratamiento del DAM, como el tratamiento químico activo, a menudo requieren un funcionamiento y un mantenimiento continuos y no siempre son eficaces a largo plazo. Esto los hace insostenibles, especialmente para los sitios mineros

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

abandonados o cerrados. Por lo tanto, existe una necesidad crítica de evaluar estrategias de prevención del DAM, que resulten rentables y sostenibles y que puedan mitigar eficazmente, los riesgos ambientales asociados con estos relaves de la minería de oro.

El presente trabajo apunta en esa última dirección, ya que pretende evaluar algunos aditivos químicos que, aplicados a los relaves, dificulten la oxidación de la pirita y, por tanto, la generación de drenajes ácidos de mina.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estimar mediante columnas de meteorización la capacidad de dos agentes orgánicos de diverso origen para modificar la tendencia a la oxidación de la pirita presente en relaves con cianuro y mercurio.

2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar mineralógicamente relaves provenientes de la minería aurífera que contienen cianuro y mercurio, mediante microscopía electrónica de barrido, análisis de fluorescencia de rayos x (FRX) y difracción de rayos x (DRX).
2. Evaluar mediante columnas de meteorización o lisímetros un aditivo orgánico a base de extracto del alga, *Ascophyllum nodosum*, para prevenir la oxidación de la pirita presente en los relaves.
3. Evaluar mediante columnas de meteorización o lisímetros un aditivo orgánico a base de leonardita para prevenir la oxidación de la pirita presente en los relaves.

3 Marco teórico

3.1 Extracción y procesamiento de minerales auríferos

Para hablar del proceso metalúrgico de beneficio del oro, se debe explicar en donde se encuentra este valioso mineral. En la minería, los minerales de valor económico se categorizan en teluros y oro nativo, siendo este último el que se encuentra presenta en la mayoría de menas, formando normalmente aleaciones en mayor o menor proporción con la plata, cobre, hierro y otros metales del grupo del platino; asociados sin mucha variación al cuarzo y los sulfuros (Pérez, 2003). Las asociaciones más comunes con los sulfuros ordenando su ocurrencia son: pirita, arsenopirita, galena, esfalerita, tetraedrita y pirrotina, aunque también se pueden asociar con minerales oxidados en superficie como, óxidos de hierro y manganeso, carbonatos y silicatos de cobre. Con lo cual, los minerales más comunes que hacen parte de la ganga y que acompañan al cuarzo son, calcita, sericita, fluorita, rodocrosita, siderita, feldespatos y minerales de alteración arcillosos (Pérez, 2003). Pérez (2003) también explica que el oro nativo se puede dar debido a procesos mecánicos en los que se mezcla con material suelto y acomodado hidráulicamente, conocidos como placeres, donde suele haber ocurrencia de minerales pesados de hierro, titanio, circonio, estaño, entre otros.

Respecto a su tratamiento varía, teniendo en cuenta que existen diversos factores condicionantes, que van desde las características geológicas del yacimiento, condiciones geográficas y naturales, aspectos socio-económicos y regulaciones ambientales. Por ende, Ortiz et al. (2009) brinda una relación de los procesos de recuperación en vista del oro y sus asociaciones:

Tabla 1*Minerales Auríferos/Procesos*

Asociación del mineral aurífero	Proceso (s)
Sulfuros de cobre	SARE (sulfuración, acidificación, reciclaje y espesamiento)
Oro libre o nativo	Gravimetría – cianuración intensiva
Sulfuros de Cu, Pb y Zn	Flot – tostación – fundición – refinación
Teluros	Lixiviación HCl + Fe ³⁺
Antimonio	Lixiviación NaCl + HCl + Fe ³⁺ + Pre-aireación con Pb NO ₃ Cianuración
Arsénico	Oxidación biológica cianuración
Carbón	Oxidación con cloro cianuración
Marcasita/pirrotina	Aireación – Cianuración / Aireación alcalina - Cianuración
Pirita	Oxidación alta temperatura (autoclaves) - Cianuración
Sulfuros consumidores de CN-	Thiourea
Refractarios carbonosos de baja ley	Oxidación biológica - Lixiviación en pilas. Thiosulfato

Nota. Fuente: Tomado y modificado de: Ortiz et al. (2009)

3.1.1 Cianuración

La cianuración es un proceso hidrometalúrgico que se emplea principalmente para la recuperación de metales preciosos, esto se debe a que se maximiza la eficiencia del cianuro en la disolución de los metales cuando se utiliza en soluciones alcalinas (Cadena, 1988). Los depósitos de oro se pueden clasificar en dos categorías, primarios y secundarios. Los depósitos primarios de oro son sulfuros, principalmente pirita y arsenopirita, y rara vez pirrotina, la cianuración de estos depósitos presenta recuperaciones del oro entre el 5% y 70% dependiendo de la composición mineralógica del depósito y de la forma en la que el oro se presente en la roca huésped. La cianuración en depósitos secundarios de oro presenta una tasa de recuperación mucho más alta, alcanzando en la mayoría de los casos más del 95% (Lehmann et., al, 2000).

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

El principio fundamental de la cianuración radica en que las soluciones alcalinas débiles actúan preferentemente como disolventes sobre el oro y la plata presentes en el mineral (Panigua 2006). Partiendo de esto, Duran (1960) explica que “El procedimiento de cianuración consiste en tratar los minerales o las colas que contienen oro y plata, con soluciones de cianuro alcalino, de ordinario inferiores a 0.5% de KCN (Cianuro de Potasio)” (p.43).

La ciencia ha dejado por experiencia que cada mineral debe estudiarse de manera particular a la hora de ser tratado por la cianuración, con esto, los minerales que son apropiados para el tratamiento con cianuro son los minerales en el cual el oro se encuentra muy finamente dividido y no presenta minerales básicos, las colas de amalgamación, minerales que contienen piritas en que el oro no está finamente diseminado, minerales auríferos-argentíferos, minerales en los cuales el oro no se amalgama y finalmente los minerales de plata (Duran 1960).

3.1.2 Amalgamación

Panigua (2006) define el término de amalgamación como “el proceso mediante el cual el mineral se une con la sustancia utilizada, en este caso mercurio, para efectos de separarlo del resto del material” (p.76). Era la técnica para extraer oro más empleada en Colombia, debido a los pocos requerimientos tecnológicos e inversión de capital, por lo tanto, las mayores emisiones de mercurio se producen mediante esta técnica, específicamente al separar el oro de la amalgama y al quemarla al aire libre, con lo cual esto ocasionó que fuese la principal fuente de emisiones de mercurio metálico en el país (Muñoz-Vallejo et al., 2012).

Perez (2003) explica que la amalgamación es un proceso en el que el mercurio se combina con el oro debido a propiedades como una mínima tensión superficial entre los dos metales, permitiendo formar una solución sólida

3.2 Residuos de tipo relave obtenidos del procesamiento de minerales auríferos

Cualquier tipo de explotación minera tienen en común la extracción y posterior beneficio de uno o varios minerales. Para lograr dicho objetivo, la molienda hace parte de una de las etapas más importantes del proceso de beneficio de un mineral. Como resultado de esta actividad y tras extraer el mineral de interés, se obtienen residuos sólidos de características granulométricas desde arcillas y limos hasta arena fina. Siendo estas partículas las denominadas “relaves” o “colas” (Beltrán-Rodríguez et al., 2018). Estos relaves generados en las plantas procesadoras son catalogados como pasivos y activos mineros (Romero y Flores, 2010).

Romero y Flores (2010) describen los pasivos ambientales mineros como aquellos que involucran labores mineras, como los botaderos (escombreras) y los relaves (presas de colas) de minas que dejaron de operar o propiamente se encuentran en abandono, siendo los relaves mineros abandonados, los que ocasionan alteraciones importantes en el medio ambiente:

- Contaminación de cursos hídricos
- Contaminación de suelos en zonas aledañas a los depósitos
- Riesgo latente de mayores afectaciones al medio ambiente
- Movilización y presencia de metales pesados en el medio físico

Los activos mineros hacen referencia a los relaves pertenecientes a minas en operación (Romero y Flores, 2010).

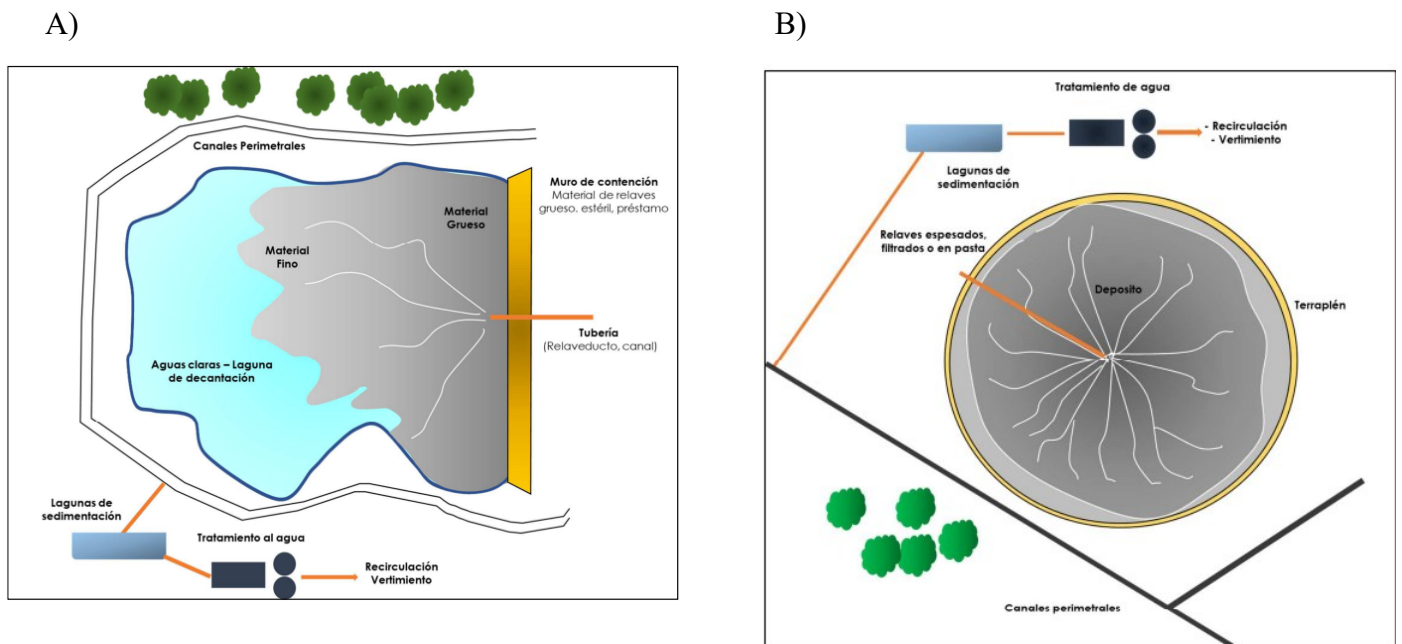
En la actualidad, la mayoría de instalaciones dispuestas para el almacenamiento de relaves corresponden a presas de relaves (**Figura 1**), las cuales ante una correcta gestión pueden subsanar el tratamiento de los residuos mineros, pero, últimamente han adquirido visibilidad mundial debido a que, ante posibles colapsos o fallas, han dado como resultado afectaciones en la integridad humana sumado a un gran impacto social, ambiental y económico. Tras esto, la industria minera a

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

nivel mundial está optando por disponer los relaves en depósitos, esto, porque no necesitan de una infraestructura tan compleja, dependen de menor área para su funcionamiento y sobre todo resguardan material con menor grado de humedad, reduciendo considerablemente el riesgo de fallas y siendo más viable generar un correcto plan de gestión (ATG, 2020).

Figura 1

Esquema básico en planta de una presa y un depósito de relaves



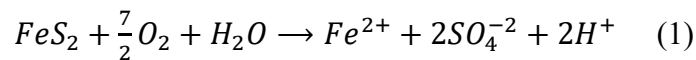
Nota. La figura A muestra el esquema de una presa de relaves y la figura B la de un esquema de un depósito de relaves. Fuente: Tomado de ATG, 2020.

3.3 Generación de un drenaje ácido de mina (DAM)

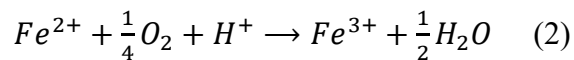
Un drenaje ácido de mina (DAM) se forma tras la oxidación de minerales de sulfuro, normalmente de hierro, como la pirita y la pirrotina, generando así la movilización de elementos traza en la roca estéril, dando como resultado un lixiviado que se caracteriza por ser de pH ácido y tener altas concentraciones de sulfatos y metales en suspensión (Amos et al., 2015).

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Sanchez-Andrea et al. (2014) describe que el proceso generador de un DAM une la acción fisicoquímica y biológica. Las reacciones que se producen se pueden explicar en fases. La primera de estas es química y se da tras la exposición de los minerales sulfurados al agua y al oxígeno. Teniendo en cuenta que el sulfuro más abundante y el que suele acompañar la mena es la pirita (FeS_2), será utilizada como ejemplo. En una condición de pH neutro, la pirita se oxida generando iones ferrosos (Fe^{2+}), sulfatos (SO_4^{-2}) y protones (H^+) causando la disminución del pH y aumentando los sólidos totales disueltos (Ec 1) (Vásquez, 2016).

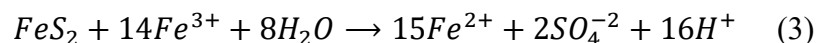


Si el ambiente ya tiene un índice de acidez muy alto, con un pH cercano a 3.0, los iones ferrosos (Fe^{2+}) oxidan a iones férricos (Fe^{3+}) (Ec 2) (Vásquez, 2016).



En un pH bajo (<4,5) el Fe^{3+} oxida la pirita a mayor velocidad que el O_2 y mucho más rápido, que como el O_2 oxida el Fe^{2+} disuelto, a Fe^{3+} . Al empezar el mecanismo biológico, las bacterias, especialmente la *Thiobacillus ferrooxidans*, funcionan como catalizadoras acelerando la oxidación en seis ordenes de magnitud desencadenando una disminución aún mayor del pH (Evangelou y Zhang, 1995).

Un factor crítico de este proceso, es como los iones férricos (Fe^{3+}) son capaces de oxidar la pirita a un ritmo de hasta 18 a 170 veces más rápido que el oxígeno (Sánchez-Andrea et al., 2014). Aduvire (2006) describe como algunos iones férricos (Fe^{3+}) no precipitan, continuando el ciclo de oxidación sobre la pirita (catálisis) generando nuevamente iones ferrosos, sulfato e hidrogeno (Ec 3).



PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Aduvire (2006) agrupa las reacciones descritas anteriormente y las resume en etapas distintivas del proceso de formación de un DAM (**Figura 2**).

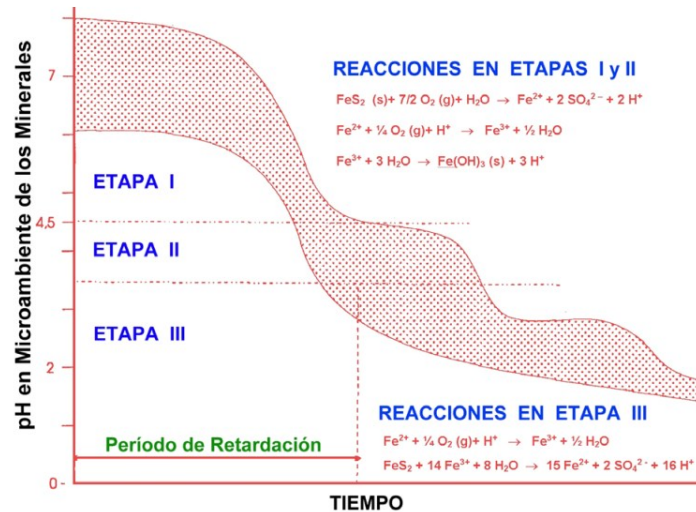
Primera etapa: Cuando ocurre la oxidación de minerales sulfurados, se libera hierro ferroso, que en condiciones neutras se oxida produciendo hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa la velocidad de oxidación es baja y la disminución del pH del agua por oxidación debida al aire y a las bacterias se producen a un ritmo semejante. Generalmente, si existe alcalinidad en el medio, esta es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente (Aduvire, 2006).

Segunda etapa: La acidez del agua supera con creces la capacidad de neutralización del medio, el pH sigue disminuyendo y predominan las bacterias como catalizadoras en la oxidación de la pirita. En la reacción se producen iones ferrosos que tras su oxidación se transforman en iones férricos, y estos al entrar en contacto con el agua dan lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, el cual es insoluble y les da una pigmentación amarilla a las aguas (Aduvire, 2006).

Tercera etapa: Cuando el pH desciende por debajo de 3, el ion férrico se ve afectado por las reacciones de oxidación-reducción y las bacterias pueden lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido, ya que se presenta un aumento de la solubilidad del hierro y se disminuye la precipitación del hidróxido férrico. Esto quiere decir que el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico, el cual oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido (Aduvire, 2006).

Figura 2

Etapas en la formación de aguas ácidas



Nota. El gráfico describe las etapas de la generación de un drenaje ácido de mina, mostrando las reacciones químicas y su comportamiento en el tiempo. Fuente: Tomado de Aduvire, 2006.

3.4 Técnicas experimentales para evaluar la formación de drenajes ácidos de mina a partir de relaves

Estas técnicas se realizan con la intención de obtener un extracto post-proceso de muestras de rocas provenientes de la minería. El material resultante, se puede usar para estimar el pH final y la liberación de ciertos componentes; este proceso también puede movilizar posibles contaminantes presentes en los sólidos, permitiendo así evaluar el lixiviado que podría generarse en campo. Es importante mencionar, que estos ensayos experimentales no simulan las condiciones reales de lixiviación en el sitio de minería (ASTM, 2021). Borie (2021) explica, que en Chile se tienen preferencias a los ensayos de lixiviación en frasco como el SPLP de la EPA y el Shake Flask Extraction de la guía MEND. Así mismo Borie (2021) plantea una dubitación sobre si es posible que estos ensayos representen con una exactitud concreta lo que ocurre en un sistema minero tan

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

complejo, esto basándose en la pequeña cantidad de muestra que se usa para llevarlos a cabo, pudiendo equipararse, tal vez, a botaderos de pequeñísimas dimensiones, con materiales homogéneos y de bajo tamaño de partícula, pero, cuando se habla de botaderos de varios miles de toneladas de materiales de diversas dimensiones, además de heterogéneos, los cuales representan distintas épocas de la historia del proceso minero, y, por lo tanto, proveniencias de distintas unidades geológicas, la realidad dice otra cosa.

En parte debido a esto, en este trabajo de investigación será utilizado el test de lixiviación en columnas, ya que se puede usar una mayor cantidad de muestra permitiendo una mejor aproximación a un proceso real de intemperismo.

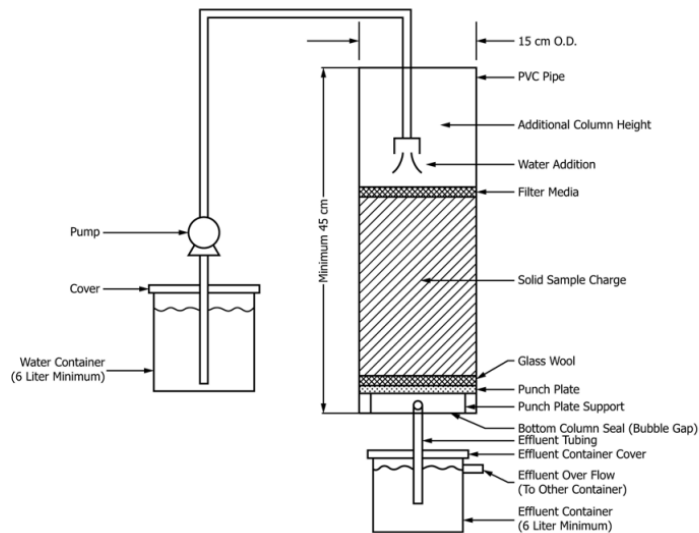
3.4.1 Test de lixiviación en columnas

El test de lixiviación en columnas se define en la norma ASTM (2021) y consiste en columnas de PVC de 15 cm de diámetro exterior, con una altura recomendada de 45 cm indicada para muestras de ensayo de 5 kg (**Figura 3**). Hacia su parte inferior, debe estar sellada teniendo justo encima una placa o plato perforado junto con su soporte y una lana de vidrio. Tanto para el agua que alimenta el sistema como para el extracto, se deben usar dos recipientes lo suficientemente grandes (6 litros aproximadamente) y, deben estar sellados, para evitar su contaminación. Su funcionamiento consiste en una alimentación de agua desde su parte superior mediante una bomba dosificadora o un dispositivo de presión constante, con la intención de inundar la columna con agua. El sistema descarga por la parte inferior pasando por la lana de vidrio y el plato perforado, finalizando su recorrido por un tipo de embudo hacia el contenedor receptor.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 3

Dispositivo de extracción por percolación en columna



Nota. Diseño del sistema de columna para la realización del test de lixiviación. Fuente: Bureau of Mining Regulation and Reclamation, Nevada Division of Environmental Protection, 1990.

3.5 Métodos para prevenir los drenajes ácidos de mina (DAM)

Para prevenir la formación de los DAM, se debe ejecutar un proceso de predicción del potencial ácido generador en áreas donde se practique la minería. Aduvire (2006) comprende las siguientes actuaciones:

- Comparación con minas similares y vecinas
- Muestreo sistemático para recogida de muestras representativas
- Pruebas estáticas sobre las muestras
- Pruebas cinéticas basadas en la reproducción de las condiciones in situ
- Modelado y simulación de los procesos ácido generadores

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Aduvire (2006) explica que este proceso predictivo, se debe comenzar desde las etapas de exploración, consistiendo en la recolección de muestras en la zona minera con la intención de realizar un análisis ácido-base descriptivo (ABA). Con estos resultados se dará una visión adicional a la fase de planeamiento de la mina, permitiendo que se considere la posibilidad de formación de los DAM durante la explotación y posterior cierre de la instalación.

El reconocimiento geológico como ítem predictivo es de suma importancia, ya que permite conocer el residuo que se generará y el lugar donde se construirán los depósitos que dispondrán de los relaves (Aduvire, 2006).

Aduvire (2006) también plantea la importancia de conocer con exactitud el volumen de muestreo para cada unidad geológica, esto con la intención de plantear los factores geológicos que influyen en la generación de un DAM, como lo son:

- Estado de oxidación de los minerales y materiales
- Composición mineralógica de los materiales ácido generadores y sulfuros
- Textura y desarrollo cristalino en los sulfuros
- Presencia de minerales ácido consumidores
- Presencia de estructuras rocosas que influyen sobre la permeabilidad.

Lo descrito anteriormente, hace parte de una caracterización tanto geoquímica como estructural, ya que, como lo menciona Aduvire (2018). Esta ayuda a reducir significativamente la posibilidad de un impacto ambiental, porque permiten desarrollar medidas de supresión o aislamiento de uno o más componentes que posibilitan la formación de un DAM, siendo estas:

- Restringir el ingreso del agua en los relaves y evitar su exposición a la meteorización
- Minimizar la penetración de oxígeno mediante el uso de cubiertas con materiales impermeabilizantes

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- Aislar los minerales sulfurosos, aplicando un tratamiento previo a su disposición en depósitos
- Controlar el pH del medio, mediante la adición de materiales alcalinos
- Emplear bactericidas para inhibir la acción bacteriana sobre los minerales

3.6 Inhibidores orgánicos en la oxidación de la pirita

La inhibición de la oxidación de la pirita se plantea como una solución definitiva para prevenir la generación de los DAM. Para este caso concreto se tuvieron en cuenta dos aditivos orgánicos comerciales: BlackDiamond y SM6.

3.6.1 *BlackDiamond (ácidos húmicos y fúlvicos)*

El nombre comercial BlackDiamond hace referencia a un aditivo orgánico obtenido de la extracción del lignito altamente oxidado, el cual se conoce como leonardita. OrganikSA (2022), describe en su ficha técnica, que este producto se solubiliza en un medio alcalino y llega a tener un alto contenido de ácidos húmicos y fúlvicos. De igual manera OrganikSA (2022) brinda las características químicas y físicas del BlackDiamond:

- Potasio soluble en agua (K_2O) = 36.0 g/L
- Carbono de extracto húmico total (C.E.H.T) = 92.60 g/L
- Carbono de ácidos húmicos (C.A.H) = 56.40 g/L
- Carbono de ácidos fúlvicos (C.A.F) = 36.20 g/L
- Sólidos insolubles en agua = 22.10 g/L
- Sodio soluble en agua (Na) = 0.34 g/L
- pH en 10% = 9.65

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- Densidad 20°C = 1.13 g/cm³
- Conductividad eléctrica en 1:200 = 0.64 dS/m

Zheng et al. (2019) explica como el ácido húmico tiene la capacidad de fijación de iones metálicos, generando una afectación en la transferencia y transformación de metales. Los ácidos húmicos también se caracterizan por contener un grupo funcional hidroxilo fenólico y otro carboxílico, los cuales hacen parte de la fracción química más activa (Loffredo & Senesi, 2007), y definen la capacidad del ácido húmico para unirse a iones metálicos y así afectar su movilidad (Ding et al., 2018a). Con lo cual Zheng et al. (2019) explica como los ácidos húmicos se adhieren a la superficie de la pirita formando una película pasiva, e inhiben una transformación posterior del sulfuro.

3.6.2 SM6 (*Extracto de algas Ascophyllum Nodosum*)

El SM6 como nombre comercial, se refiere a un bioestimulante con extracto muy concentrado del alga *Ascophyllum nodosum* (Plymag, s.f.). Plymag (s.f.) describe el contenido del aditivo:

- Ácido algínico = 6 % p/p (peso del soluto en 100 gr de solución)
- Manitol = 2.0% p/p
- Materia orgánica = 23.0 % p/p
- Carbono orgánico = 13 % p/p
- pH (directo) = 5.1
- Densidad = 1.15 kg/L

Autores coinciden en que los componentes activos del alga *Ascophyllum Nodosum*, como los alginatos (derivados del ácido algínico) los cuales en contacto con el agua forman geles que

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

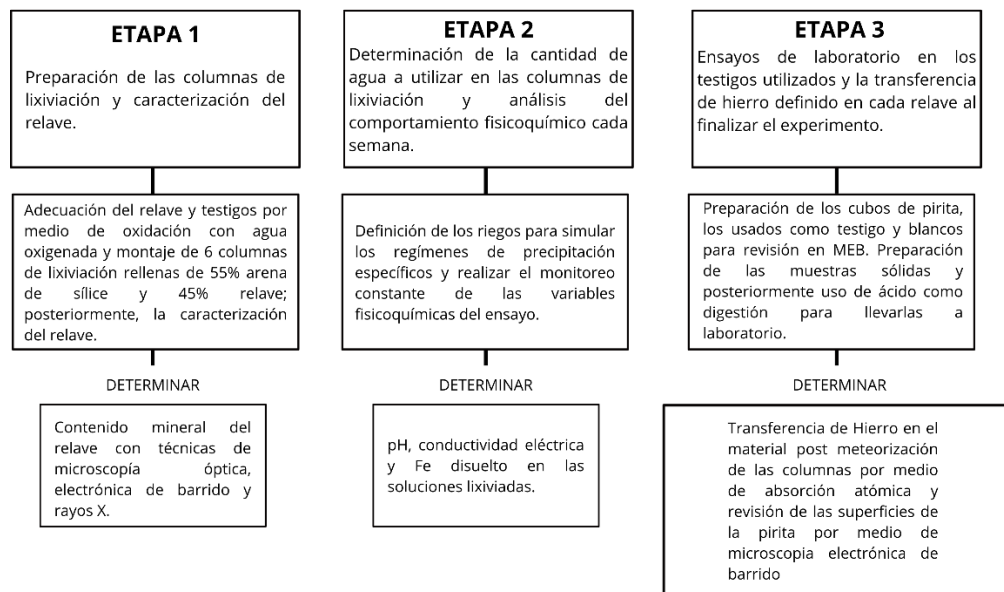
impiden el paso físico del oxígeno y los florotánicos quienes funcionan de manera antimicrobiana y antioxidante, afectando de manera directa las bacterias acidófilas, pueden funcionar como inhibidores en la tendencia de oxidación de sulfuros (Yabur et al., 2007; Casey et al., 2026).

4 Metodología

En el siguiente apartado se presenta la fase experimental a detalle usada en el desarrollo del trabajo de investigación, donde se usó como material, relave proveniente de la minería aurífera. El desglose metodológico se llevó a cabo por etapas las cuales se especifican en la **Figura 4**

Figura 4

Fase metodológica llevada a cabo en tres etapas



4.1 Etapa 1 Preparación de las columnas de lixiviación y caracterización del relave

El relave utilizado en este trabajo experimental fue dado por el grupo de investigación GIMBA de la Universidad Industrial de Santander adscrito a la Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas y, tiene su proveniencia de una zona aurífera ubicada en Santa Rosa del Sur (Bolívar). Este material presentó una diversidad de procesos: concentración gravimétrica, seguido de molienda utilizando mercurio, esto para recuperar el oro libre, y por último cianuración para la obtención de oro submicroscópico o asociado a sulfuros como la pirita u otras fases portadoras de este. Esto al final, da lugar a un material fuertemente agotado (relave), que fue depositado durante más de 20 años en relaveras, las cuales actualmente tienen más de una década abandonadas. Para la realización del experimento, se hizo un montaje de 6 columnas de lixiviación, las cuales fueron fabricadas con tubos de tipo PVC con las siguientes dimensiones: 40 cm de longitud y 10.16 cm de diámetro. Adicionalmente fueron usados 6 cubos de pirita (**Figura 5**), los cuales se introdujeron dentro de cada columna a una profundidad de 6 cm (**Figura 7**) con la intención de que actuaran como material testigo, para obtener un registro de los procesos fisicoquímicos que acontecen dentro de cada columna.

Parte del relave y 2 cubos de pirita tuvieron un proceso adicional de oxidación química. Este tratamiento químico usado en dos de las columnas, tiene como nombre Net Acid Production Test (NAPT), donde se usa el peróxido de hidrógeno para acelerar la oxidación de los sulfuros con el objetivo de simular situaciones extremas, en las cuales el relave ya se encuentra muy intemperado y sus procesos ácido génicos se encuentran ya activados («Technical Report Acid Mine Drainage Prediction», 1994). Para el proceso adicional de oxidación, se tuvo en cuenta que el reporte técnico mencionaba el uso de peróxido de hidrogeno concentrado al 15%, pero, diversas investigaciones adicionales coincidían en fijar concentraciones menores, como del 7.5% para

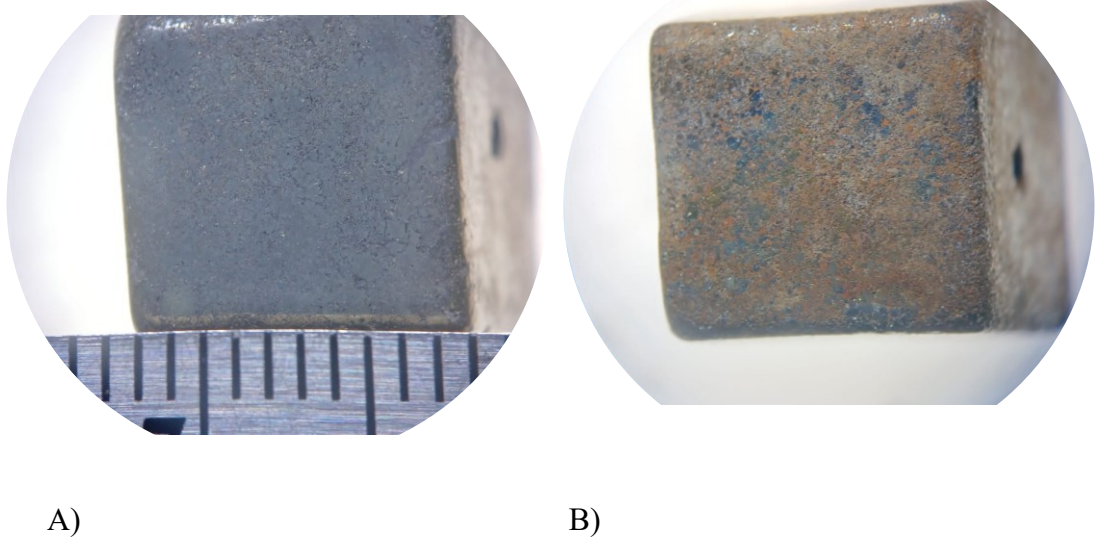
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

relaves con menor contenido de azufre (Abfertiawan et al. , 2023), con lo que para el trabajo experimental realizado se terminó definiendo una concentración de peróxido de hidrogeno del 9.5%. La solución en cuestión consistió en la mezcla de agua y peróxido de hidrógeno (H_2O_2 concentrado al 50%); esto como se mencionó anteriormente, para lograr una dilución de H_2O_2 al 9.5%. Las cantidades se definieron teniendo en cuenta la bibliografía donde se hablaba de una relación de 5g de muestra por 100 ml de peróxido de hidrogeno, con lo que, por la disponibilidad de este, se disminuyó su cantidad 1 orden de magnitud (10 veces menos); esto definió que se usaran un total de 20 litros de solución, donde, 16.2 litros fueron de agua y 3.8 litros de peróxido que tuvieron una equivalencia de 81.1% agua y 18.9% de peróxido de hidrógeno, y a esta solución se le añadió 10 kilos de relave. El pH inicial de la solución fue de 5.1 (**Apéndice A**) y tras añadir el relave su pH disminuyó a 2.2 y así se mantuvo las primeras 3 horas, al cabo de 24 horas su pH final subió hasta 3.0 (**Apéndice B**). Estos valores se obtuvieron usando un medidor portátil de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine HI981 previamente calibrado con soluciones patrones (**Apéndice C**). Además, el relave se mezcló con arena de sílice a una proporción de 55 Arena y 45 Relave, para aumentar su porosidad y permeabilidad.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 5

Cubos de pirita usados como testigos dentro de cada columna

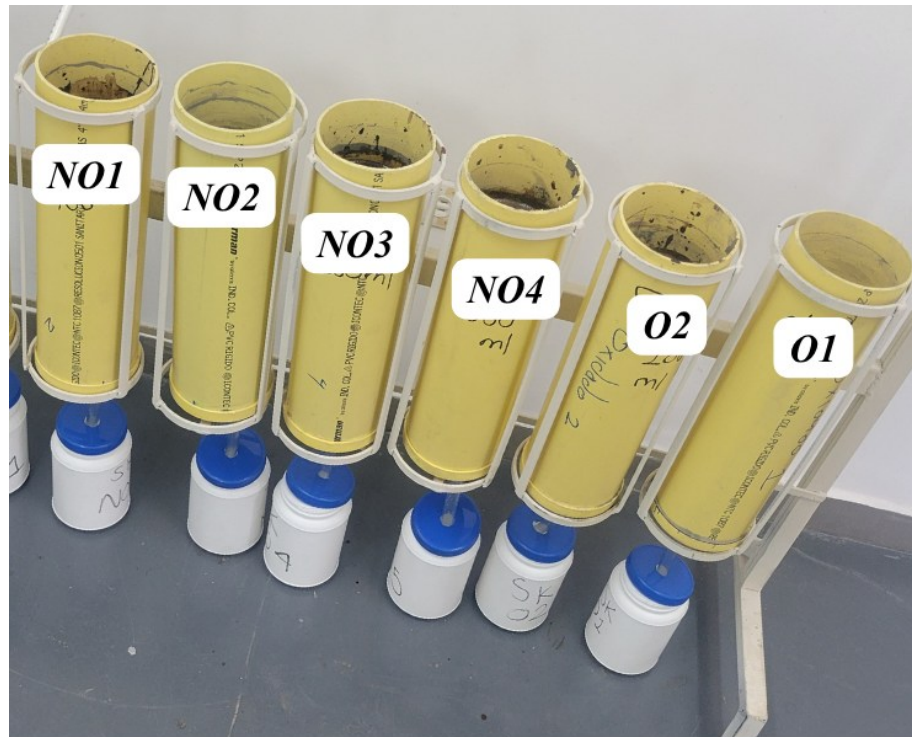


Nota. Se presentan los cubos, vistos bajo una lupa: En la figura A se observa el cubo de pirita sin tratamiento previo el cual representa los 4 cubos usados como testigos en el material adecuado No Oxidado En la figura B se ve el cubo oxidado que representa los dos testigos utilizados en el material Oxidado.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 6

Columnas de lixiviación



Nota. Columnas de lixiviación y su respectiva identificación respecto al tratamiento utilizado, el cual se describe en la **Tabla 2**

Para la oxidación de los cubos de pirita, se usó la misma relación de agua y peróxido, pero ajustado al peso de los cubos. Los cubos pesaron 13.79 gramos por lo que se necesitó 27.58 mililitros de solución que equivalen a 5.21 mililitros de H_2O_2 (18.9%) y 22.37 de H_2O (81.1%).

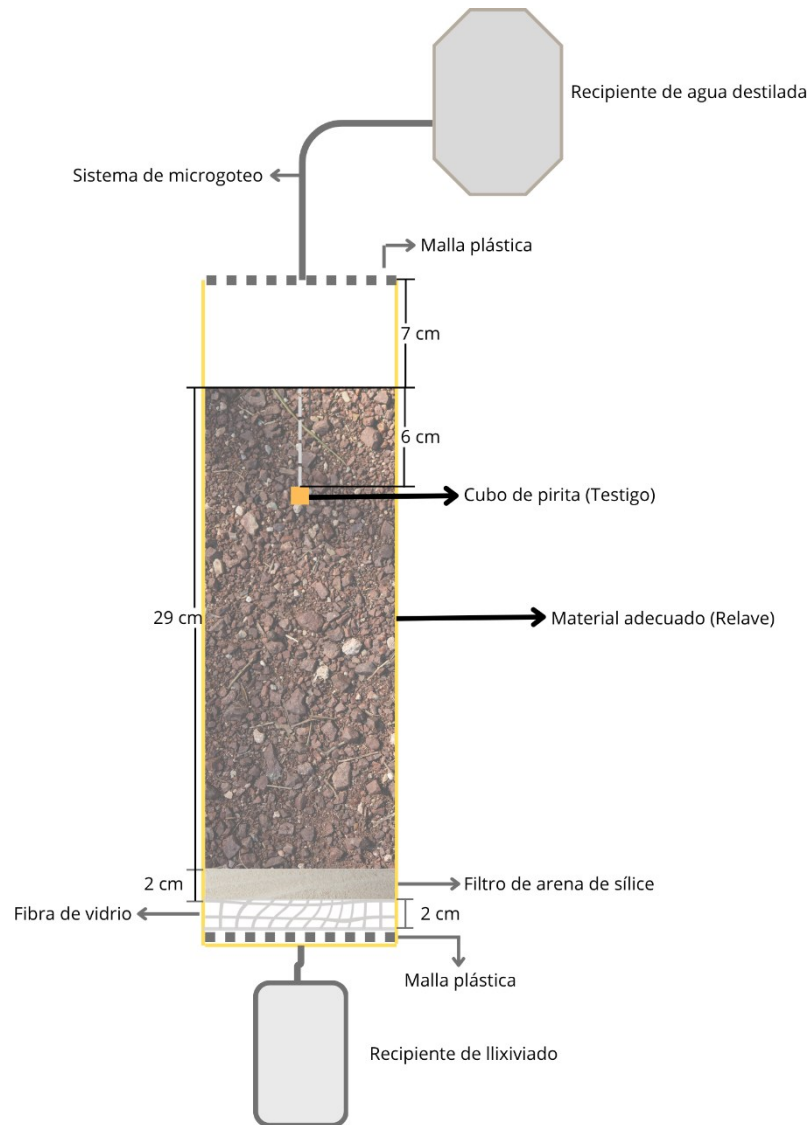
Para el montaje de cada columna de lixiviación se utilizaron dos mallas de plástico, fibra de vidrio y arena de sílice la cual funcionó como filtro. El armado consistió en colocar una de las mallas de plástico hacia la parte inferior, posteriormente colocar 2 cm de fibra de vidrio, luego 2 cm de arena de sílice y al final se colocó el relave previamente adecuado (mezcla con arena para todos y el proceso de oxidación para dos de los rellenos), donde este ocupó 29 cm de la longitud total de la columna. Ya para finalizar el respectivo montaje, se colocó la última malla de plástico

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

hacia la parte superior, lugar donde se alimentó de agua, dejando una longitud libre de 7 cm desde la malla mencionada hasta el relave. Cada columna tuvo un peso de 5730 gr.

Figura 7

Esquema del montaje de las columnas de lixiviación



Nota. Esquema que representa el montaje y acomodación de cada columna de lixiviación.

Cuatro de las seis columnas fueron tratadas con dos aditivos bioestimulantes de uso agrícola llamados SM6, derivado de algas marinas (*Ascophyllum nodosum*) y BlackDiamond, derivado de la leonardita (mineraloide orgánico formado por la oxidación del lignito). Las dos

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

columnas restantes se usaron como controles respectivos. La cantidad de aditivo a utilizar se calculó teniendo en cuenta un valor de 0.2% Carbono Orgánico Total (COT) para cada una de las columnas. Este porcentaje se fijó por la disponibilidad del recurso, pero, también dándole la relevancia a diversos estudios donde se consideró como un umbral mínimo de activación biológica, teniendo en cuenta que se podría considerar un valor de transición técnica, ya que es 10 veces mayor que los valores de COT registrados en ambientes hiperáridos como el núcleo del desierto de Atacama (Neilson et al., 2017). Además, el 0.2% de COT, coincide en el estándar que permite diagnosticar y reconocer la presencia de carbono orgánico funcional en horizontes minerales (United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 2014).

Teniendo en cuenta el peso total de relleno (5730 gr) se desarrolló la siguiente ecuación (Ec 1):

$$\frac{x}{5730 \text{ g} + x} * 100 = 0.2\% \text{ COT}$$

$$\frac{x}{5730 + x} * 100 = 0.2$$

$$(5730 + x) * \left(\frac{100x}{5730 + x} \right) = (0.2) * (5730 + x)$$

$$100x = 1146 + 0.2x$$

$$100x - 0.2x = 1146$$

$$99.8x = 1146$$

$$x = \frac{1146}{99.8} = 11$$

$$x = 11 \text{ gr COT} \rightarrow 0.2\% \text{ COT} \quad (\text{Ec 1})$$

Luego de tener la masa de COT que debía tener cada columna se revisó este mismo parámetro en cada aditivo teniendo así un total de $20 \frac{\text{gr}}{\text{l}}$ de COT para el SM6 y $100 \frac{\text{gr}}{\text{l}}$ de COT

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

para el BlackDiamond. Posteriormente se realizó la adición para cada columna, teniendo así al final, los tratamientos descritos en la Tabla X:

Tabla 2

Tratamientos realizados en cada columna de lixiviación

Tratamientos aplicados por columna de lixiviación		
Código	Descripción	Tratamiento
NO1	Columna con material no oxidado y tratamiento de BlackDiamond	Se aplicó 110 ml de BlackDiamond. 11 gr de COT
NO2	Columna con material no oxidado sin tratamiento. Control de experimento	No se aplicó ningún tratamiento
NO3	Columna con material no oxidado y tratamiento de BlackDiamond duplicado	Se aplicó 220 ml de BlackDiamond. 22 gr de COT
NO4	Columna con material no oxidado y tratamiento de SM6	Se aplicó 520 ml de SM6. 11 gr de COT
O1	Columna con material oxidado sin tratamiento. Control de experimento	No se aplicó ningún tratamiento
O2	Columna con material no oxidado y tratamiento de BlackDiamond	Se aplicó 110 ml de BlackDiamond. 11 gr de COT

Nota. La tabla describe el manejo experimental que fue dado a cada columna de lixiviación

El material adecuado se categorizó como Oxidado y No Oxidado y se caracterizó mineralógicamente mediante estas técnicas de laboratorio:

-Rayos X: Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X (FRX)

-Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

4.1.1 Rayos X

4.1.1.1 Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X es una técnica usada para identificar la cristalinidad de las muestras a estudiar, dicha técnica revela los picos que corresponden a las fases cristalinas respectivas. Las muestras a analizar fueron el material adecuado Oxidado y No Oxidado los cuales fueron llevados al servicio técnico del laboratorio de rayos X UIS. Para ello, se utilizó un difractómetro de polvos marca Bruker, modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, y la radiación impartida fue de tipo $\text{CuK}\alpha$.

4.1.1.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos x se usa principalmente para realizar análisis químicos de elementos, siendo el objetivo principal determinar la composición elemental de las muestras. Las muestras a analizar fueron el material adecuado Oxidado y No Oxidado las cuales fueron llevadas al servicio técnico del laboratorio de rayos X UIS. Para este análisis se utilizó el espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca BRUKER modelo S6 JAGUAR permitiendo una cualificación de los elementos desde el Na al U.

4.1.2 Microscopía

4.1.2.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta de análisis de superficie que permite tener información morfológica, topográfica y de composición química. La información específica de morfología y topografía se obtiene a partir de las imágenes de electrones secundarios (SE), los contrastes de composición a partir del número atómico se consiguen en las imágenes de

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

electrones retrodispersados (BSE) y por último el microanálisis químico elemental se logra a partir de un espectrómetro de energía dispersiva (EDS). Tanto las muestras del material adecuado oxidado y no oxidado como los respectivos cubos de pirita, fueron llevados al laboratorio de microscopia UIS para su análisis. Para esto se usó el microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650.

4.2 Etapa 2 Determinación de la cantidad de agua a utilizar en las columnas de lixiviación y análisis del comportamiento fisicoquímico cada semana

El volumen de agua utilizado para el riego de cada columna se parametrizó a partir de la precipitación promedio entre diciembre de 1985 a diciembre del 2025 para el municipio de Santa Rosa del Sur, eligiendo tres meses que representaron; mes lluvioso (noviembre), mes normal (marzo) y mes seco (enero). Este municipio se escogió teniendo en cuenta su alta precipitación y el origen del relave. Los datos de precipitación se obtuvieron del IDEAM, 2026. Para definir el volumen de agua, se calculó el área transversal de las columnas dando como resultado 0.008107 m^2 . Las columnas fueron regadas 2 veces a la semana con agua destilada por medio de un sistema de micro goteo conectado a un recipiente el cual se llenaba con el volumen exacto a utilizar; este micro goteo se regulaba de manera que el caudal de riego fuese lo más bajo posible. En la **Tabla 3** se representa el total de volumen de agua regado y su relación con el respectivo mes de precipitación:

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Tabla 3

Definición de el volumen de agua a regar en el experimento

SEMANA	VOLUMEN (ml)	RIEGOS		TOTAL (L/m ²)	MES
		PRECIPITACIÓN (L/m ²)			
1	317.64	39.2		138.1	Noviembre
2	278.50	34.4			
3	268.03	33.1			
4	255.24	31.5			
5	192.18	23.7		23.7	Marzo
6				0	Enero
7					Mes con ausencia de riegos
8					
9					
10	186.61	23.0		57.4	Marzo
11	156.58	19.3			
12	122.47	15.1			

Nota. Volumen de agua a regar y su relación con el promedio de precipitación entre diciembre de 1985 a diciembre de 2025, en el municipio de Santa Rosa del Sur, Bolívar.

Los lixiviados se recolectaban semana tras semana, teniendo como referencia el primer riego, esto para tener un total de 72 muestras. Tras cada recolección se analizaron pH y conductividad eléctrica usando un medidor portátil de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine HI981, el cual se calibraba con soluciones patrón a pH de 7,0 y 4,0, y conductividad eléctrica de 1314 μ S. Además, se tomaron lixiviados de la semana 1, semana 5, semana 10 y semana 12, a los cuales se les midió la cantidad de hierro disuelto utilizando espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Para esta medición, 20 ml de las alícuotas se sometieron a un proceso de digestión por medio de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, agregando una cantidad de 2 ml (**Apéndice E**); este proceso de digestión se realiza para lograr la ruptura de los enlaces químicos y lograr una degradación de la matriz orgánica e inorgánica que pueda tener el hierro atrapado. Estas pruebas se realizaron en el equipo Agilent 240FS AA del Laboratorio del grupo GIMBA-UIS, con técnicas de flama.

4.3 Etapa 3 Ensayos de laboratorio en los testigos utilizados y la transferencia de hierro definido en cada relave al finalizar el experimento

En esta, la etapa final del experimento, se realizaron dos acciones con las columnas. La primera consistió en la extracción de cada uno de los testigos (cubos de pirita) (**Apéndice G**), los cuales fueron lavados con agua destilada y puestos en un horno de secado BINDER a 60 °C por 24 horas. Luego de esto, se les colocó cinta de cobre, en algunas de sus caras, para permitir una mejor visualización de la superficie empleando el microscopio electrónico de barrido (MEB).

Además, se oxidó un cubo adicional usando H_2O_2 (Peróxido de hidrógeno) teniendo en cuenta los siguientes valores: Este cubo se usó como referencia frente a los testigos. Los testigos se almacenaron y junto al cubo adicional oxidado más 3 cubos que se usaron como blanco, fueron llevados al laboratorio de microscopía UIS, y analizados por el microscopio electrónico de barrido (MEB), con la intención de ver la superficie y la composición química de los procesos ocurridos.

La segunda acción, fue la recolección de una cantidad superior a 10 gr de sólido de cada una de las columnas, extraídos a una profundidad estándar de la ubicación de los testigos; también se tomaron dos muestras de igual masa del material original Oxidado y No Oxidado, para tener dos blancos de referencia frente a las columnas. Las muestras de las columnas fueron secadas a 80 °C por 24 horas (**Apéndice F**) para luego pesar 10 gr de cada una (**Apéndice D**). A continuación, fueron mezcladas en tubos de Erlenmeyer con 100 ml de agua destilada, para ser colocadas en un agitador a 50 RPM por 24 horas (**Apéndice D**). Luego de esto, fueron filtradas hasta tres veces para evitar el paso de sólidos y se almacenaron 50 ml de cada solución preparada. Y para finalizar, al igual que con los lixiviados, se realizó un proceso de digestión ácida con HCl, agregando 2 ml a cada muestra de 50 ml. Para finalizar estas muestras fueron etiquetadas y entregadas al

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Laboratorio del grupo GIMBA-UIS para realizar las pruebas de AAS en el equipo Agilent 240FS, con técnicas de flama.

5 Resultados

5.1 Caracterización mineral del material utilizado en las columnas

Los análisis por medio técnicas de microscopía y rayos x, permitieron tener una visión concreta del material utilizado, además de los procesos ocurridos tras el proceso de oxidación.

5.1.1 *Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)*

En esta técnica, se analizaron las imágenes de Electrones Secundarios (SE), Electrones Retro dispersados (BSED) y los respectivos EDS.

Para el relave no oxidado en el primer sector analizado (**Figura 8**), en la imagen BSED se resalta una matriz grisácea, que indica una composición elemental de bajo número atómico (Z) que hace contraste con minerales de mayor brillo, indicando su alto número atómico, además, algunos minerales presentan alto brillo hacia sus bordes y más opacos hacia el núcleo. En la SE se observa que la gran mayoría de minerales tienen caras poco definidas, además de un desgaste importante hacia los bordes, a excepción de algunos que presentan mayor brillo en BSED.

Respecto al EDS se tiene que para el **punto 1** se tienen valores de plomo (6.06%), azufre (8.68%), hierro (6.21%) y en gran medida oxígeno (48.51%), lo que nos indica un sulfuro de plomo y trazas de hierro coincidiendo con precisión con la galena; la muestra también presenta más elementos en menores cantidades como la sílice (5.86%), aluminio (2.33%), además de minerales trazas como el cobre (0.50%) y el arsénico (0.22%).

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

El **punto 2** presenta altas concentraciones de azufre (35.59%) y hierro (20.12%) que corresponden al mineral de pirita, destaca la alta presencia de oxígeno (31.65%) y presenta menores cantidades de sílice (1.78%) y aluminio (1.68%) y elementos trazas como sodio (0.80%), magnesio (0.60%) y potasio (0.27%).

El **punto 3** tiene una composición de arsénico (17.10%), azufre (8.03%) y hierro (20.39%) lo que da una correspondencia a la arsenopirita. También se observan valores relevantes de oxígeno (20.71%) y en menores cantidades aluminio (1.38%), sílice (5.99%) y molibdeno (3.26%).

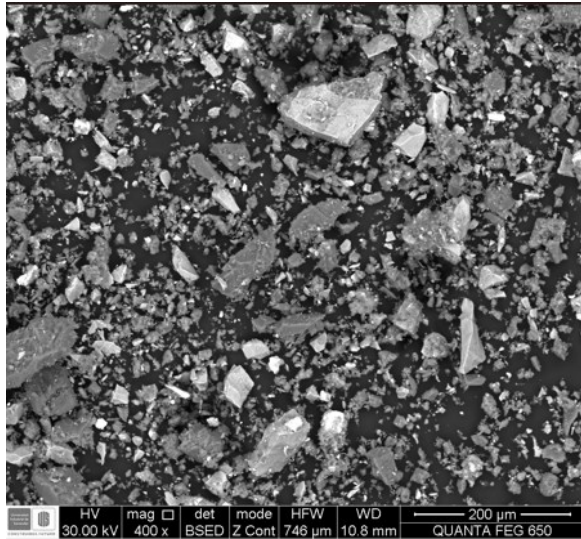
El **punto 4** presenta grandes concentraciones de arsénico (17.70%), azufre (4.64%) y hierro (4.71%) correspondientes a la arsenopirita, pero también, unos valores relevantes de oxígeno (28.94%) y sílice (11.58%) y en menores cantidades aluminio (3.75%), la muestra se completa con elementos trazas como el sodio (0.44%), molibdeno (0.72%), potasio (0.20%) y cobre (0.71%).

Para el **punto 5** se tienen concentraciones de oxígeno (56.50%) y sílice (20.43%) que corresponden a un mineral de cuarzo y en menores cantidades aparecen elementos como sodio (0.39%) magnesio (0.36%), aluminio (2.46%), azufre (1.41%), potasio (0.44%) y hierro (0.75%).

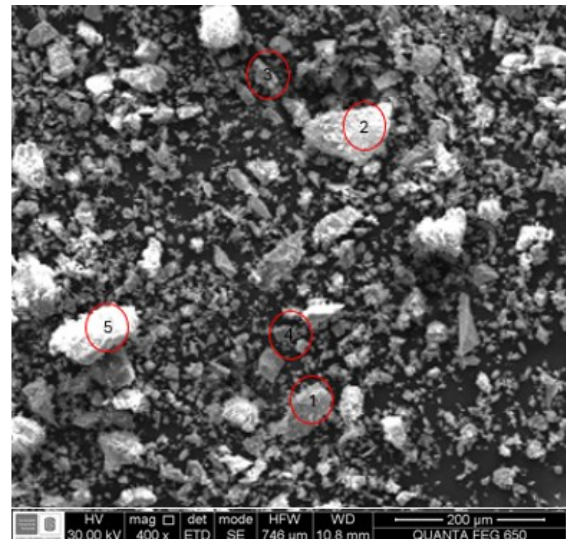
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 8

Imágenes MEB del primer sector analizado para el relave no oxidado



A)



B)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	08.13	21.61
<i>OK</i>	24.33	48.54
<i>AlK</i>	01.97	02.33
<i>SiK</i>	05.16	05.86
<i>SK</i>	08.72	08.68
<i>FeK</i>	10.86	06.21
<i>CuK</i>	00.99	00.50
<i>AsK</i>	00.51	00.22
<i>PbL</i>	39.33	06.06
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.01	07.51
<i>OK</i>	16.87	31.65
<i>NaK</i>	00.61	00.80
<i>MgK</i>	00.49	00.60
<i>AlK</i>	01.51	01.68
<i>SiK</i>	01.67	01.78
<i>SK</i>	38.04	35.59
<i>KK</i>	00.35	00.27
<i>FeK</i>	37.45	20.12
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

3

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	07.31	23.15
<i>OK</i>	08.71	20.71
<i>AlK</i>	00.98	01.38
<i>SiK</i>	04.42	05.99
<i>MoL</i>	08.22	03.26
<i>SK</i>	06.77	08.03
<i>FeK</i>	29.92	20.39
<i>AsK</i>	33.67	17.10
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

4

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	10.38	26.61
<i>OK</i>	15.03	28.94
<i>NaK</i>	00.33	00.44
<i>AlK</i>	03.29	03.75
<i>SiK</i>	10.56	11.58
<i>MoL</i>	02.24	00.72
<i>SK</i>	04.84	04.64
<i>KK</i>	00.25	00.20
<i>FeK</i>	08.55	04.71
<i>CuK</i>	01.47	00.71
<i>AsK</i>	43.06	17.70
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

5

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	11.06	17.26
<i>OK</i>	48.25	56.50
<i>NaK</i>	00.48	00.39
<i>MgK</i>	00.46	00.36
<i>AlK</i>	03.54	02.46
<i>SiK</i>	30.63	20.43
<i>SK</i>	02.41	01.41
<i>KK</i>	00.93	00.44
<i>FeK</i>	02.23	00.75
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. A) Vista en Electrones Retrodispersados (BSED) del primer sector del material no oxidado. B) Vista en Electrones Secundarios (SE) del primer sector del material no oxidado.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

En el segundo sector que se analizó para el relave no oxidado (**Figura 9**), la imagen BSED nos muestra las dos fases minerales definidas además que se resalta en mejor medida la presencia de una matriz de grano fino, atómicamente liviana, con incrustaciones de minerales de mayor número atómico. En la imagen SE (**Figura 9B**) se resalta mejor la irregularidad de los bordes de grano más generalizado para todos los minerales.

Para el EDS se tiene que para el **punto 6** presenta azufre (25.29%) y zinc (21.42%) los cuales definen a la esfalerita y adicional presenta altos valores de oxígeno (28.97%) y en menores cantidades aparecen elementos como aluminio (4.53%), sílice (5.38%), potasio (0.60%) y hierro (1.14%).

En el **punto 7** se observa azufre (41.58%) y zinc (36.20%) que se asocian y definen la esfalerita, valores relevantes de oxígeno (12.27%) y en menores cantidades aparecen elementos como aluminio (1.18%), sílice (3.66%) y hierro (3.12%).

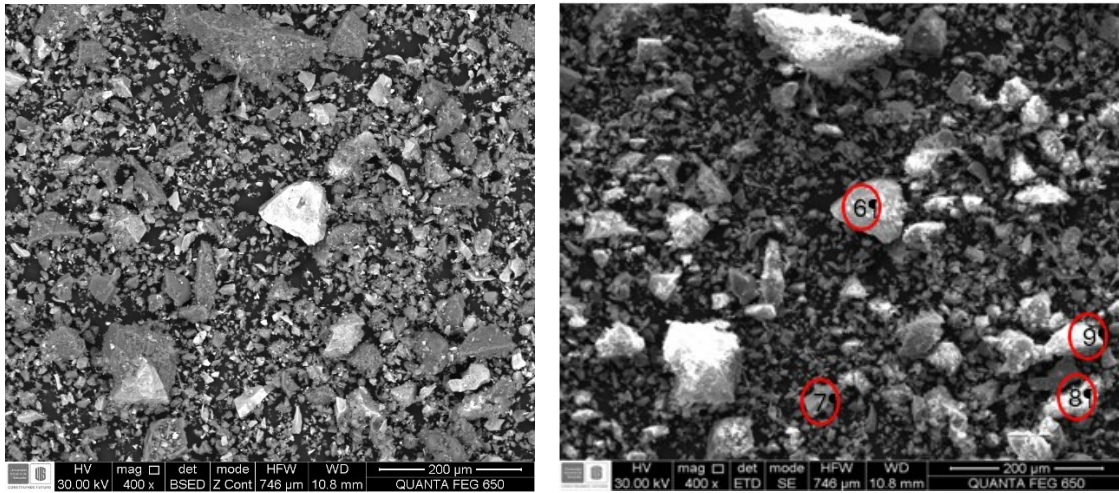
El **punto 8** indica la presencia de azufre (32.28%) y hierro (19.94%) los cuales componen a una pirita, también se observan valores altos de oxígeno (32.57%) y en menores cantidades aparecen elementos como aluminio (2.03%) y sílice (5.29%).

El **punto 9**, el último para el relave no oxidado, muestra concentraciones de oxígeno (53.70%) y sílice (17.29%) que indican la presencia de cuarzo, y en menores cantidades aparecen elementos como magnesio (0.53%), aluminio (1.20%), Azufre (8.07%), potasio (0.14%) y hierro (3.89%).

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 9

Imágenes MEB del segundo sector analizado para el relave no oxidado



A)

6

Element	Wt%	At%
CK	04.77	12.66
OK	14.54	28.97
AlK	03.83	04.53
SiK	04.74	05.38
SK	25.44	25.29
KK	00.73	00.60
FeK	02.01	01.14
ZnK	43.93	21.42
Matrix	Correction	ZAF

B)

7

Element	Wt%	At%
CK	00.57	01.99
OK	04.64	12.27
AlK	00.75	01.18
SiK	02.43	03.66
SK	31.53	41.58
FeK	04.11	03.12
ZnK	55.96	36.20
Matrix	Correction	ZAF

9

8

Element	Wt%	At%
CK	03.19	07.89
OK	17.56	32.57
AlK	01.84	02.03
SiK	05.00	05.29
SK	34.88	32.28
FeK	37.52	19.94
Matrix	Correction	ZAF

Element	Wt%	At%
CK	08.88	15.19
OK	41.84	53.70
MgK	00.63	00.53
AlK	01.57	01.20
SiK	23.64	17.29
SK	12.60	08.07
KK	00.26	00.14
FeK	10.58	03.89
Matrix	Correction	ZAF

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Nota. A) Vista en Electrones Retrodispersados (BSED) del segundo sector del material no oxidado. B) Vista en Electrones Secundarios (SE) del segundo sector del material no oxidado.

La **Figura 10** muestra el primer sector analizado para el material oxidado. En la imagen BSED se observa una presencia notable de granos minerales de un tamaño considerable que presentan mayor brillo, por ende, un mayor número atómico, dentro de una matriz más fina y opaca indicando un menor número atómico. En la imagen SE se ve a detalle la irregularidad de los granos y la poca definición de sus caras.

En el análisis EDS se tiene que para el **punto 1** se tienen altas concentraciones de azufre (38.23%), y hierro (17.34%) lo que indica que el mineral de esta muestra es pirita; también posee alto contenido de oxígeno (23.99%) y elementos trazas de aluminio (1.69%) y sílice (2.43%).

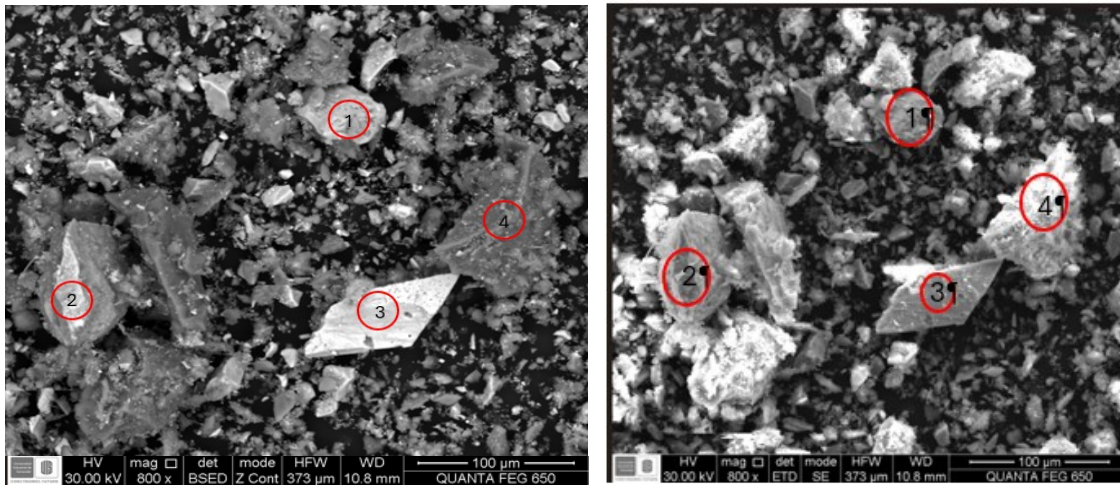
Para el **punto 2** se observan altas concentraciones de oxígeno (55.04%), sílice (13.44%), aluminio (9.51%), hierro (7.20%) y magnesio (5.79%); indicando que la muestra es un mineral perteneciente al grupo de las arcillas; los elementos trazas que completan la muestra es sodio (0.38%), azufre (2.49%), potasio (0.18%) y calcio (0.20%).

Para el **punto 3**, se muestra una composición principalmente de zinc (82.12%) siendo el elemento principal, debido a este pico tan alto se deduce que es un mineral de zinc puro o alterado, los minerales trazas que completan la muestra es la sílice (3.02%), hierro (3.47%), oxígeno (3.67%), cobre (2.15%), azufre (0.39%) y aluminio (1.29%).

Para el **punto 4** hay concentraciones de oxígeno (60.03%) y sílice (25.27%), lo que nos indica que es un mineral de cuarzo perteneciente a la matriz, además de tener elementos traza de Al, Mo, S y Fe.

Figura 10

Imágenes MEB del primer sector analizado para el relave oxidado



A)

1

Element	Wt%	At%
CK	06.79	16.33
OK	13.29	23.99
AlK	01.58	01.69
SiK	02.36	02.43
SK	42.45	38.23
FeK	33.53	17.34
Matrix	Correction	ZAF

3

Element	Wt%	At%
CK	00.79	03.89
OK	00.99	03.67
AlK	00.59	01.29
SiK	01.43	03.02
SK	00.21	00.39
FeK	03.27	03.47
CuK	02.30	02.15
ZnK	90.43	82.12
Matrix	Correction	ZAF

B)

2

Element	Wt%	At%
CK	03.11	05.77
OK	39.48	55.04
NaK	00.39	00.38
MgK	06.31	05.79
AlK	11.50	09.51
SiK	16.92	13.44
SK	03.58	02.49
KK	00.32	00.18
CaK	00.36	00.20
FeK	18.02	07.20
Matrix	Correction	ZAF

4

Element	Wt%	At%
CK	07.63	12.18
OK	50.09	60.03
AlK	01.36	00.96
SiK	37.01	25.27
MoL	00.93	00.19
SK	01.38	00.82
FeK	01.61	00.55
Matrix	Correction	ZAF

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Nota. A) Vista en Electrones Retrodispersados (BSED) del primer sector del material oxidado.

B) Vista en Electrones Secundarios (SE) del primer sector del material oxidado.

La **Figura 11** muestra el segundo sector de la muestra oxidada. En la imagen BSED se observan granos de diversos tamaños, destacándose los más grandes de color opaco, característica de menor número atómico, también se observa una matriz y minerales un poco más grandes con variabilidades de colores opacos y brillantes, definiendo así una combinación mineralógica de alto y bajo número atómico. La imagen SE destaca la irregularidad de los bordes de grano, destacándose tres de estos con las caras definidas.

Respecto al EDS se tiene que para el **punto 5** hay altas concentraciones de azufre (14.15%) y plomo (10.14%) que indica un mineral de galena, además de presentar un pico de oxígeno (51.60%) y elementos traza de sílice (4.28%), aluminio (1.85%) y hierro (0.99%).

En el **punto 6** se ven concentraciones de azufre (35.81%) y hierro (26.92%) lo cual permite definir que se trata de un mineral de pirita, además de observarse valores de oxígeno de 9.41%.

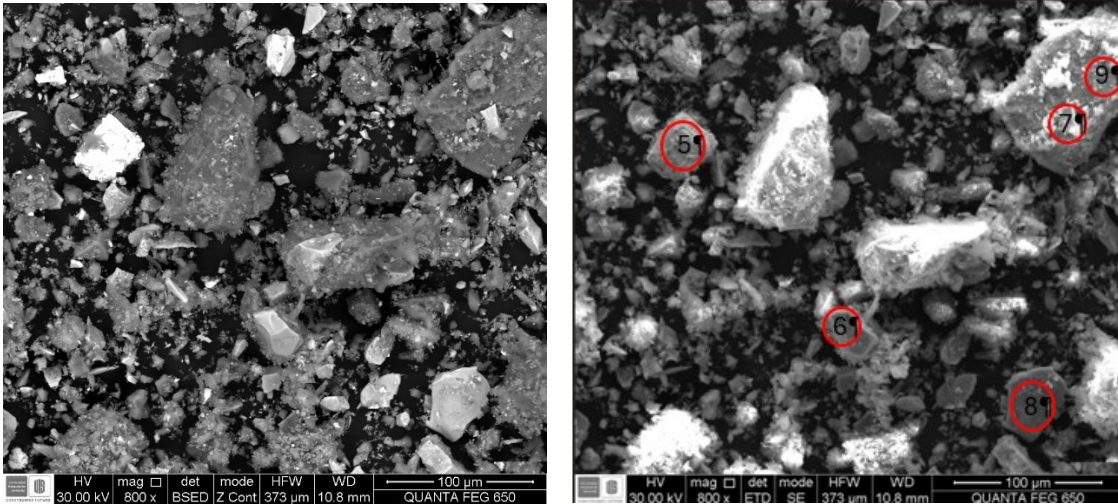
En el **punto 7** se tiene azufre (37.39%) y hierro (21.09%) indicando un mineral de pirita; aunque también hay valores altos de oxígeno (18.54%) y en menor cantidad de sílice (1.97%) y aluminio (1.27%).

Para el **punto 8** se tienen concentraciones de azufre (40.36%) y hierro (33.35%), los cuales se caracterizaron como un mineral de pirita, además se tuvieron concentraciones de oxígeno (12.92%), sílice (2.17%) y aluminio (1.91%).

Por último, para el **punto 9** únicamente presenta oxígeno (50.59%) y sílice (38.81%), lo que nos indica un mineral de cuarzo.

Figura 11

Imágenes del MEB del segundo sector analizado para el relave oxidado



A)

5

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	05.36	16.99
<i>OK</i>	21.67	51.60
<i>AlK</i>	01.31	01.85
<i>SiK</i>	03.15	04.28
<i>SK</i>	11.91	14.15
<i>FeK</i>	01.45	00.99
<i>PbL</i>	55.15	10.14
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

B)

6

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	10.14	26.64
<i>OK</i>	04.77	09.41
<i>SiK</i>	01.09	01.22
<i>SK</i>	36.37	35.81
<i>FeK</i>	47.63	26.92
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

7

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	07.90	19.74
<i>OK</i>	09.89	18.54
<i>AlK</i>	01.14	01.27
<i>SiK</i>	01.84	01.97
<i>SK</i>	39.97	37.39
<i>FeK</i>	39.26	21.09
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

8

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.36	09.99
<i>OK</i>	05.78	12.92
<i>AlK</i>	00.91	01.21
<i>SiK</i>	01.70	02.17
<i>SK</i>	36.18	40.36
<i>FeK</i>	52.08	33.35
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

9

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	06.28	10.60
<i>OK</i>	39.93	50.59
<i>SiK</i>	53.78	38.81
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. A) Vista en Electrones Retrodispersados (BSED) del segundo sector del material oxidado.

B) Vista en Electrones Secundarios (SE) del segundo sector del material oxidado.

En conjunto todos los resultados brindados por el MEB, permite definir las los minerales identificados para el material oxidado y no oxidado, las cuales se plasman en la **Tabla 4** y la **Tabla 5**.

Tabla 4

Minerales identificados en el material no oxidado empleando microscopía electrónica de barrido (MEB).

Minerales del material no oxidado	
<i>FeS₂</i>	Pirita
<i>ZnS</i>	Esfalerita
<i>FeAsS</i>	Arsenopirita
<i>PbS</i>	Galena
<i>SiO₂</i>	Cuarzo

Tabla 5

Minerales identificados en el material oxidado empleando microscopía electrónica de barrido (MEB).

Minerales del material oxidado	
<i>FeS₂</i>	Pirita
<i>Zn</i>	Mineral de Zinc puro o alterado
<i>PbS</i>	Galena
<i>SiO₂</i>	Cuarzo

5.1.2 Rayos X

En el uso de esta técnica, el relave oxidado y no oxidado se caracterizó mineralógicamente usando la difracción de rayos x (DRX) para conocer las fases cristalinas y la fluorescencia de rayos x (FRX) para conocer la composición elemental.

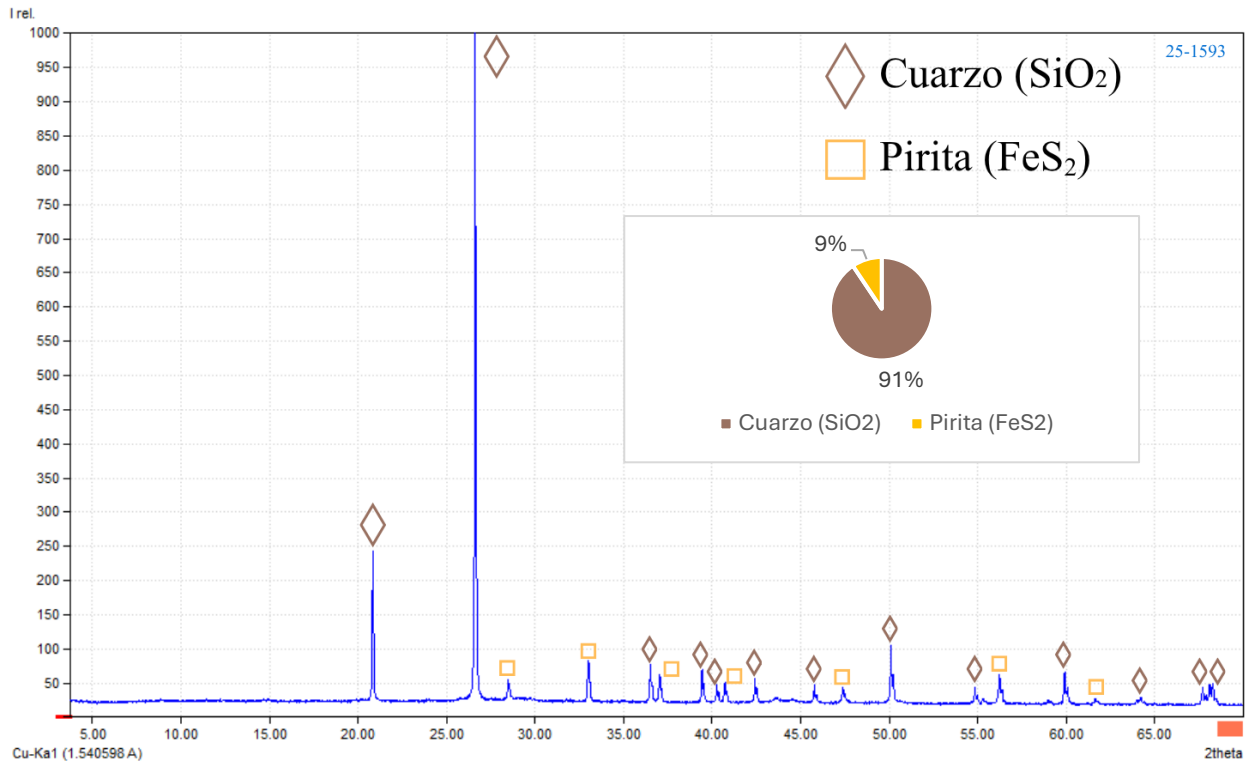
5.1.2.1 Difracción de Rayos X (DRX)

A través del DRX se analizaron las muestras del material adecuado oxidado y no oxidado, permitiendo identificar las fases cristalinas presentes.

En la **Figura 12** se observa el difractograma obtenido a partir del análisis DRX del material no oxidado. Se identificaron dos fases cristalinas; una perteneciente a un mineral del grupo de los silicatos llamado cuarzo (SiO_2) y un mineral del grupo de los sulfuros llamado pirita (FeS_2). Mediante el análisis también se conoció su distribución cuantitativa, la cual correspondió a un 91% para el cuarzo y un 9% para la pirita.

Figura 12

Difractograma obtenido a partir del análisis DRX de una muestra del material adecuado no oxidado

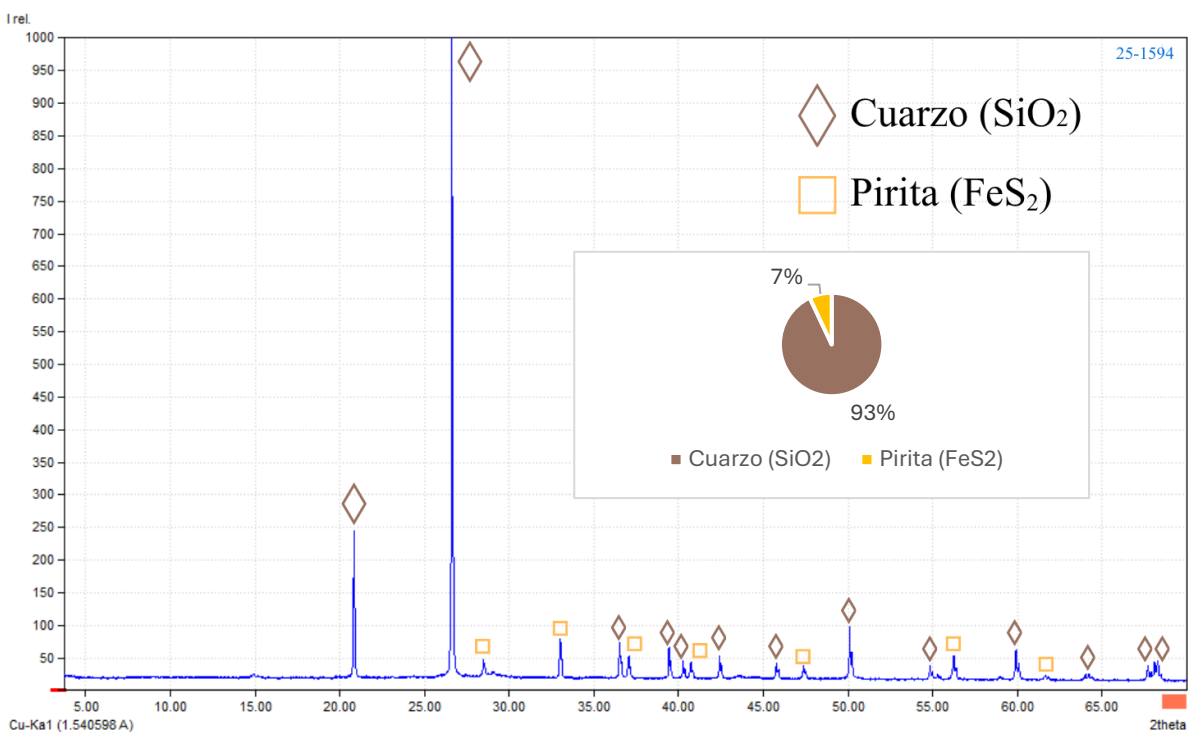


PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

El difractograma obtenido del DRX a partir del material oxidado (**Figura 13**), permitió identificar una fase cristalina perteneciente al cuarzo (grupo de los silicatos) y otra a la pirita (grupo de los sulfuros). De igual manera, el análisis permitió cuantificarlos, teniendo un 93% de cuarzo y un 7% de pirita.

Figura 13

Difractograma obtenido a partir del análisis DRX de una muestra del material adecuado no oxidado



5.1.2.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Por medio del análisis FRX se identificó la composición elemental del material oxidado y no oxidado.

En la **Tabla 6** se observan los elementos dispuestos en el material no oxidado. Se destaca la alta presencia de elementos livianos catalogados como otros (42.34%), además de sílice (28.92%), hierro (14.6%) y azufre (5.43%). Se observan como trazas, elementos que destacan por su alto número atómico como el Pb, Mo, As, Zn, Cu, Ni y otras trazas elementales como el Mn, Cr, Ca, K y Al.

Tabla 6

Cuantificación elemental obtenida a partir del FRX para el material no oxidado

Elemento	Concentración (%)
Si	28.92
Fe	14.6
S	5.43
Pb	1.9
Zn	1.87
Al	1.06
Cr	0.87
As	0.7
K	0.55
Ni	0.51
Cu	0.48
Ca	0.46
Mo	0.20
Mn	0.11
Otros	42.34

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

En la **Tabla 7** se observan los elementos cuantificados para el material oxidado. Se destaca la alta presencia de elementos livianos catalogados como otros (42.25%), además de sílice (28.79%), hierro (14.62%) y azufre (5.77%). Se observan como trazas, elementos que destacan por su alto número atómico como el Pb, Mo, As, Zn, Cu, Ni y otras trazas elementales como el Cr, Ca, K y Al.

Tabla 7

Cuantificación elemental obtenida a partir del FRX para el material oxidado

Elemento	Concentración (%)
Si	28.79
Fe	14.62
S	5.77
Pb	2.02
Zn	1.81
Al	1.20
As	0.73
Cr	0.71
K	0.62
Ca	0.48
Cu	0.43
Ni	0.41
Mo	0.16
Otros	42.25

5.2 Control de pH y conductividad eléctrica de los lixiviados semanales además de Fe disuelto en las muestras representativas

El pH y la conductividad eléctrica como propiedades fisicoquímicas, tuvieron un comportamiento relevante en cada tratamiento, dando una visión completa de lo ocurrido dentro de cada columna.

En la **Figura 14** se observan los valores de pH y conductividad eléctrica para las mediciones realizadas en los lixiviados de las columnas con material Oxidado. Respecto al pH,

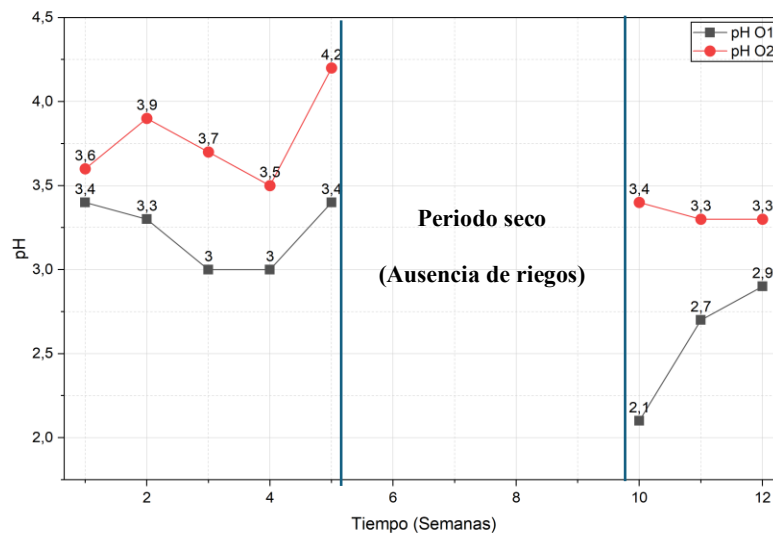
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

antes del tiempo seco, el cual va de la semana 6 a la 9, se tienen valores que oscilan entre 3 y 4.2: Aquí se observa que la columna O2 la cual tiene un tratamiento con BlackDiamond, presenta valores más altos de pH (≥ 3.5) respecto al control O1. Luego del tiempo seco se tiene una disminución importante en el pH, pasando a tener un rango de 2.1 a 3.4. Aun así, el tratamiento con BlackDiamond sigue manteniendo un valor de pH mayor al Control.

Para la conductividad eléctrica, se tiene que esta aumenta con la cantidad de sales disueltas y transportadas en el lixiviado. Teniendo en cuenta que la tendencia analizada fue para el material Oxidado, se observan dos características importantes; para antes del tiempo seco, en la columna O1, estos valores son menores respecto a la O2. Después del tiempo seco se observa que, a diferencia de las primeras medidas, la conductividad eléctrica de la columna O1 crece relevantemente frente a la O2.

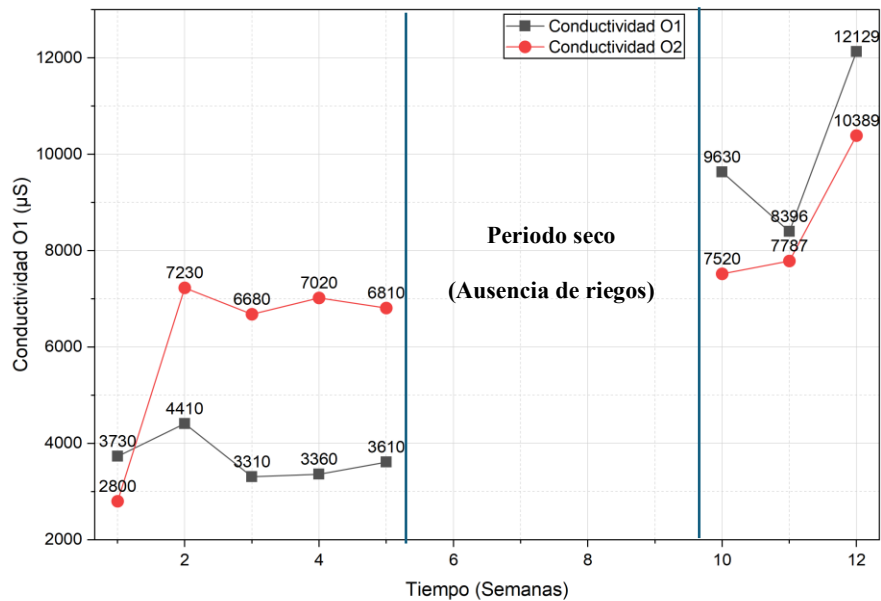
Figura 14

Comportamiento semanal del pH y la conductividad eléctrica de las muestras líquidas extraídas de las columnas oxidadas



A)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



B)

Nota. A) Comportamiento del pH de los lixiviados para las columnas con material Oxidado. B) Comportamiento de la conductividad eléctrica de los lixiviados para las columnas con material Oxidado.

En la **Figura 15** se contemplan los comportamientos respectivos de los lixiviados extraídos de las columnas con el material no oxidado. Antes del tiempo en el que se interrumpió el riego, el pH de la columna Control (NO2) y la de BlackDiamond (NO1) tuvieron un rango bajo de 4.2 a 5.4, siendo el valor más alto un lixiviado donde se usó el tratamiento. Estos valores vuelven a caer tras el tiempo seco presentando un rango de 3.2 a 3.6. La columna que fue tratada con la doble cantidad de BlackDiamond (NO3) mostró un aumento significativo del pH, el mayor de los tratamientos, para antes del tiempo seco, logrando la neutralidad del lixiviado, pero, cayendo estrepitosamente tras el tiempo seco, mostrando nuevamente valores por debajo de 5. Por último, el tratamiento con SM6 (NO4) mostró un aumento del pH desde la primera semana de recolección

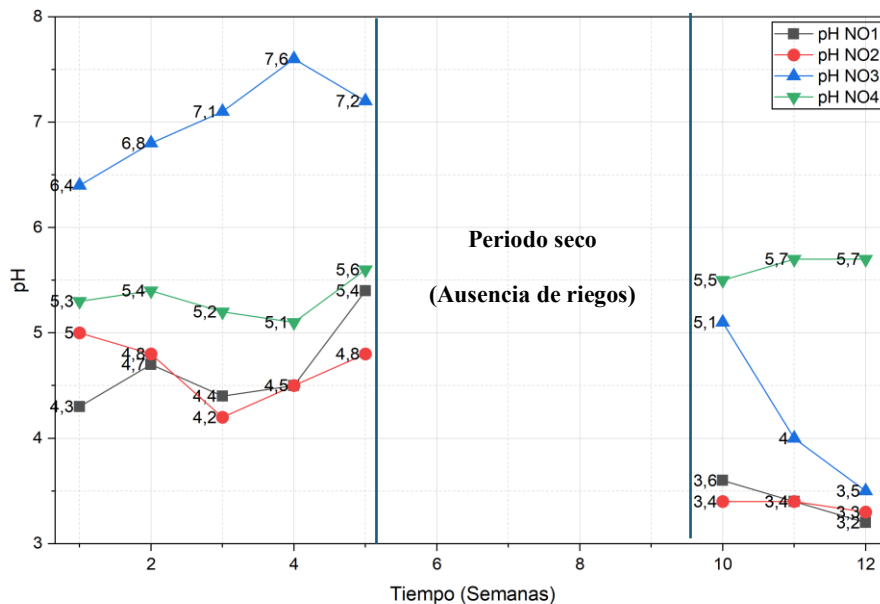
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

y mantuvo estos valores a lo largo de todo el experimento, aunque sin llegar a la neutralidad, si mostró un equilibrio y una proyección al alza para el pH. La inclinación de los resultados muestra que para antes del tiempo seco el pH tuvo valores más altos, pero, justo después de este tiempo se observó como volvieron a bajar.

Los valores de conductividad eléctrica en todos los tratamientos, para antes y después del tiempo seco son mayores respecto al Control (NO2). El SM6 muestra los valores más altos de conductividad eléctrica oscilando entre 22000 y 31000 μS .

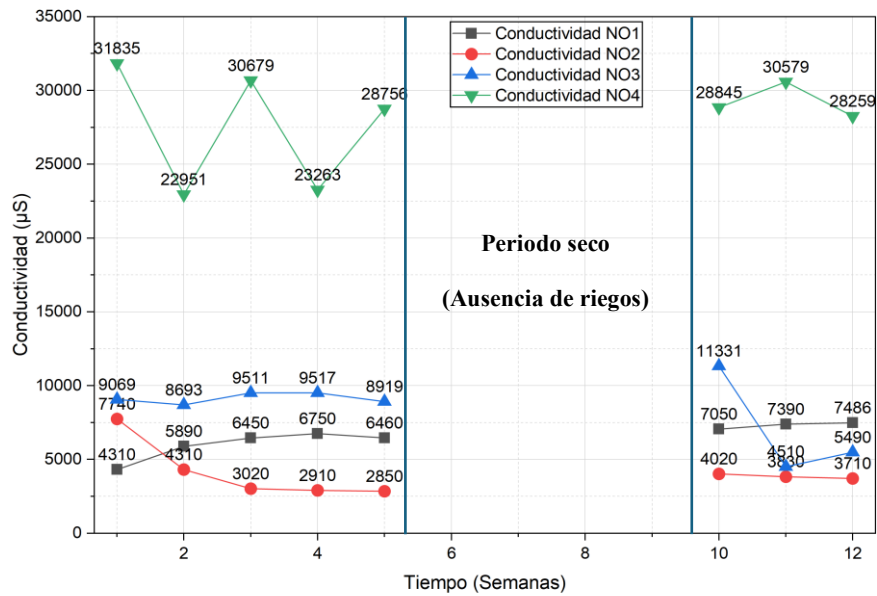
Figura 15

Comportamiento semanal del pH y la conductividad eléctrica de las muestras líquidas extraídas de las columnas no oxidadas



A)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



B)

Nota. A) Comportamiento del pH de los lixiviados para las columnas con material no oxidado.

B) Comportamiento de la conductividad eléctrica de los lixiviados para las columnas con material no oxidado.

Los análisis de Fe disuelto en los lixiviados para los materiales oxidados y no oxidados se presentan en la **Figura 16**. En el material oxidado, la columna control (O1) mantuvo concentraciones de Fe consistentemente superiores al tratamiento con BlackDiamond (O2). Tras el periodo de ausencia de riego (semanas 6 a 9), se observó un incremento notable en la semana 10 para O1 (896.94 mg/L), mientras que O2 mantuvo niveles mínimos (2.31 mg/L). Hacia la semana 12, el control alcanzó su valor máximo (1098.35 mg/L), superando ampliamente al tratamiento O2 (233.89 mg/L).

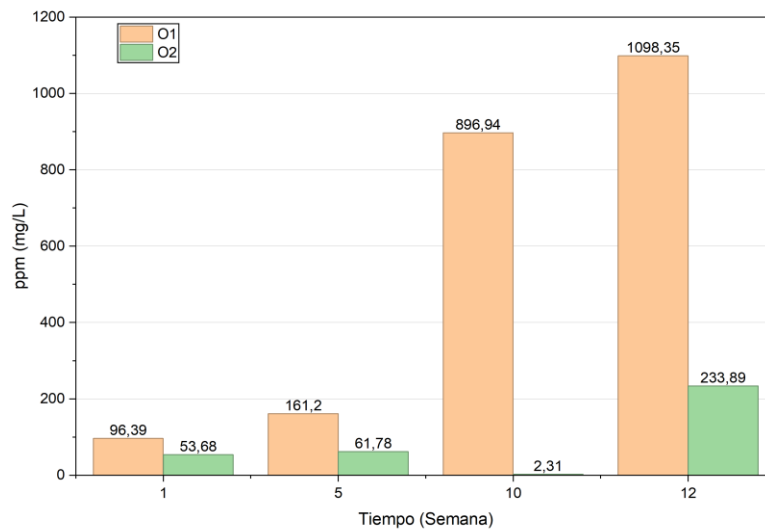
Respecto al material no oxidado las concentraciones de Fe fueron reducidas y similares entre tratamientos durante las primeras 10 semanas, con oscilaciones menores en NO3 y NO4. Sin

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

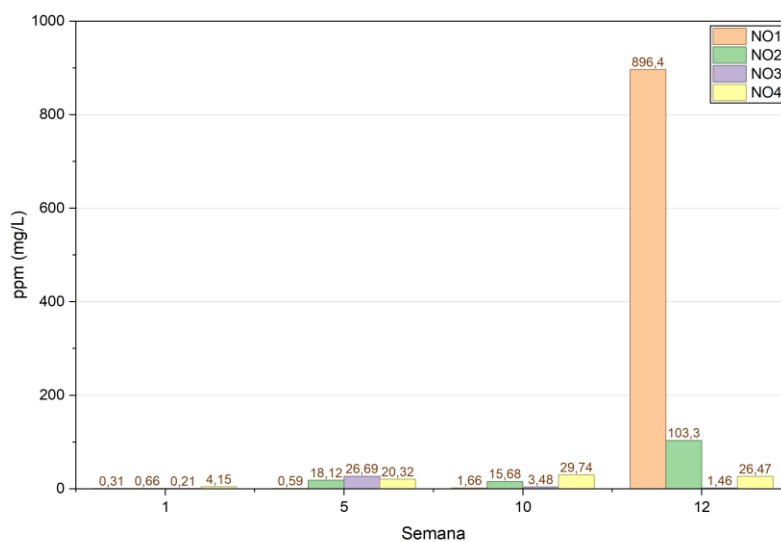
embargo, en la semana 12, se registró un aumento significativo en la columna NO1 (896.4 mg/L), superando de forma marcada al control NO2 (103.3 mg/L) y a los demás tratamientos, los cuales permanecieron por debajo de 30 mg/L.

Figura 16

Fe presente en los lixiviados de las muestras representativas



A)



B)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Nota. A) Fe presente en los lixiviados de las columnas oxidadas. B) Fe presente en los lixiviados de las columnas no oxidadas.

5.3 Evaluación de la modificación superficial de los testigos en cada columna

El análisis de las superficies de los testigos permitió conocer la morfología (Imágenes SE), el contraste a partir del número atómico (Z) de los minerales presentes (imágenes BSED) y la composición química puntual (imágenes EDS).

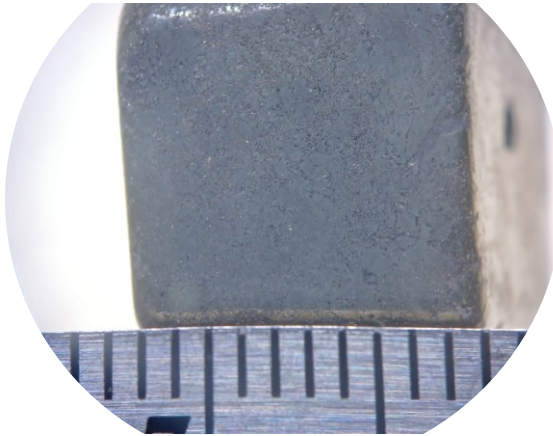
En la **Figura 17A**, se observa que el cubo de pirita, usado como blanco de referencia frente a los testigos no oxidados, no presenta alteraciones sobre su superficie, mostrando un color uniforme. El análisis SE (**Figura 17B**) permite evidenciar una topografía característicamente lisa sin grietas ni alteraciones importantes de su relieve. Solo se observan pequeños levantamientos regulares. En el BSED (**Figura 17C**) se observan dos grupos minerales; el claro (alto número atómico) que ocupa la mayor parte de la superficie y el opaco (bajo número atómico) que se observa como pequeñas manchas. En la **Figura 17D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual.

En la **Figura 18** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 53.02% de S y 28.34% de Fe, además se resalta una cantidad importante de O (18.64%). En contraste, el análisis del **Punto 2** revela la presencia de otro sulfuro compuesto de S (29.61%), Fe (11.55%) y Cu (14.34%), pudiendo ser una calcopirita. También se tienen valores de O (11.16%) y As (4.32%), además de trazas de Sb, Zn y Si. Para el **Punto 3** se muestran valores que indican una composición bastante variable con picos de O (44.86%) y Ca (15.84%), además que se tiene la presencia de Mg, Fe, Mn, Al, Cl, S y Si.

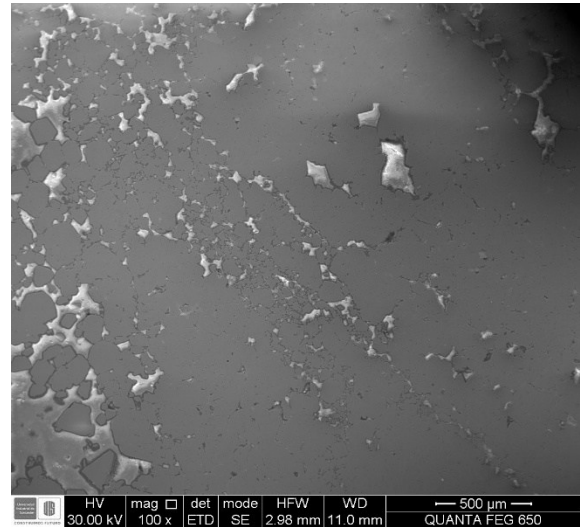
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 17

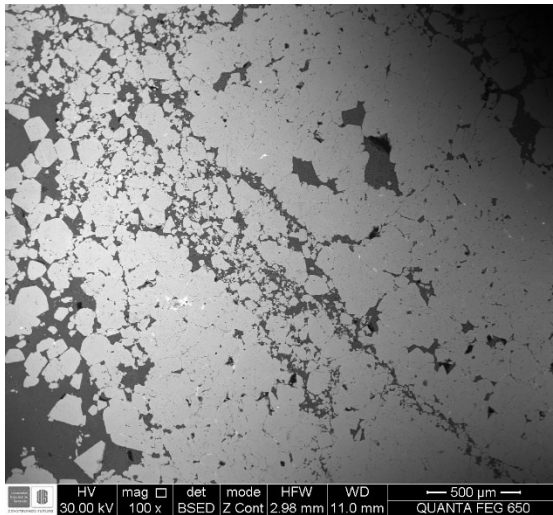
Cubo sin oxidar usado como blanco de referencia



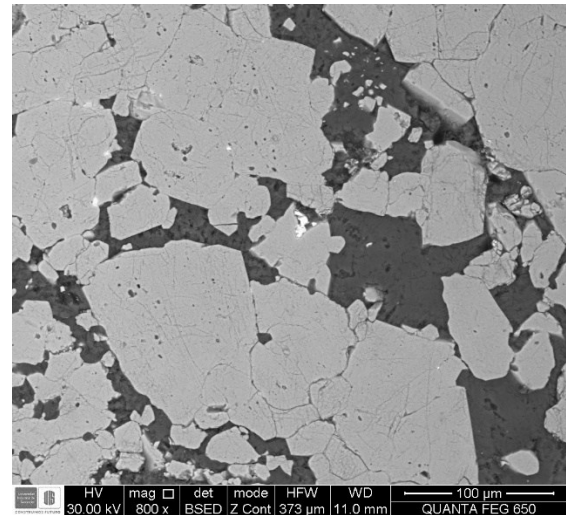
A)



B)



C)



D)

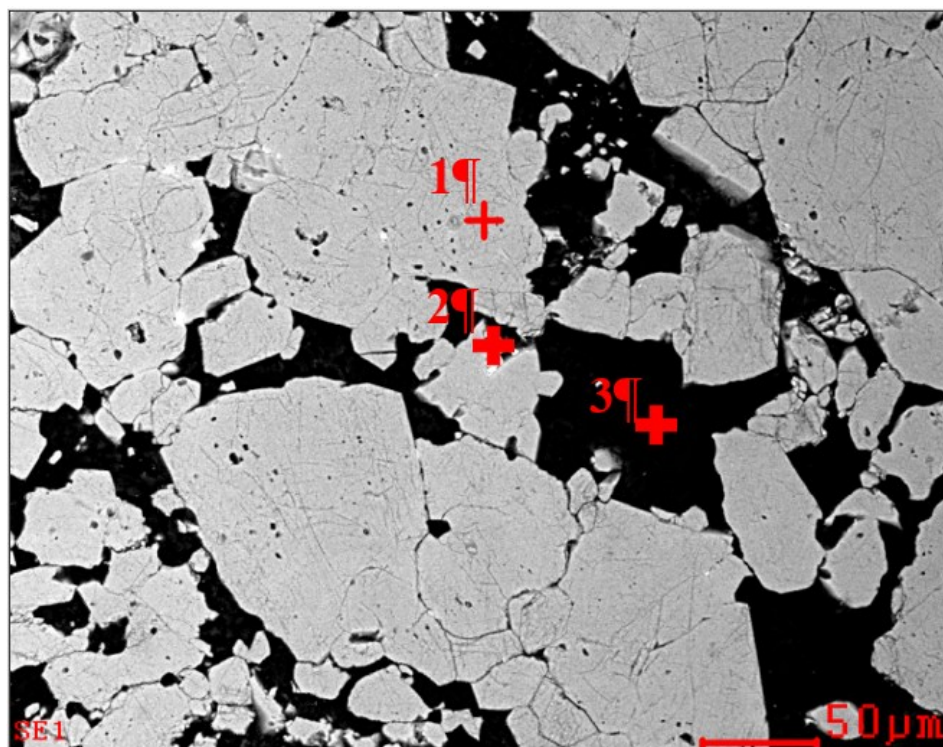
Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita no oxidado usado como un blanco de referencia respecto a los demás cubos. B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D)

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 18

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo no oxidado



1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	08.33	18.64
<i>SK</i>	47.47	53.02
<i>FeK</i>	44.20	28.34
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	08.39	25.29
<i>OK</i>	04.93	11.16
<i>SiK</i>	00.71	00.91
<i>SK</i>	26.23	29.61
<i>SbL</i>	05.85	01.74
<i>FeK</i>	17.82	11.55
<i>CuK</i>	25.18	14.34
<i>ZnK</i>	01.95	01.08
<i>AsK</i>	08.94	04.32
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

3

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	12.03	22.41
<i>OK</i>	32.08	44.86
<i>MgK</i>	08.38	07.71
<i>AlK</i>	01.92	01.59
<i>SiK</i>	00.97	00.78
<i>SK</i>	00.61	00.43
<i>ClK</i>	00.40	00.25
<i>CaK</i>	28.37	15.84
<i>MnK</i>	04.14	01.69
<i>FeK</i>	11.08	04.44
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

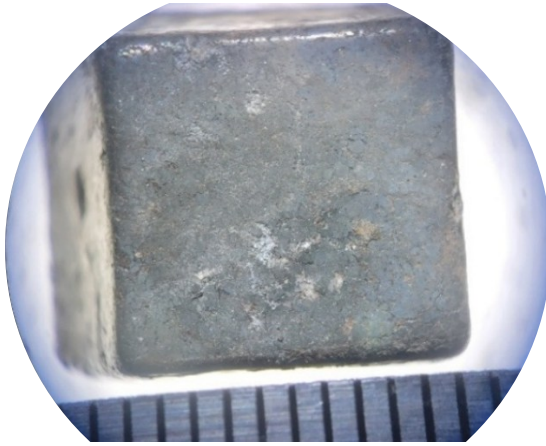
En la **Figura 19A**, se observa que el primer testigo de pirita (columna NO1) presenta zonas rojizas que indican patinas de oxidación, además de dos pequeños sectores de colores blanquecinos que pueden indicar rellenos minerales. El análisis SE (**Figura 19B**) permite evidenciar una topografía muy irregular, mostrando zonas con levantamientos notables y de alta rugosidad. En el BSED (**Figura 19C**) a primera vista se ven dos fases minerales, una más clara y otra opaca. Esto ayuda a definir la presencia de dos grupos minerales atómicamente, uno pesado, zona brillante y liviano, zona grisácea. En la **Figura 19D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual, visto en BSED, lo que permite ver más a detalle la presencia de las dos fases minerales.

En la **Figura 20** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 27.81% de S y 16.74% de Fe, además se resalta una cantidad importante de O (24.49%) y trazas elementales de As, K y Al. En contraste, el análisis del **Punto 2** revela una composición compleja rica en O (30.82%) y Si (26.15%), además de trazas importantes de K (9.08%) y Al (8.18%).

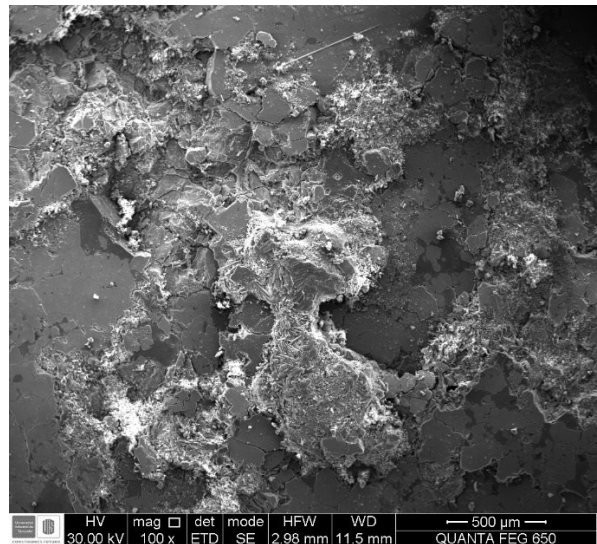
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 19

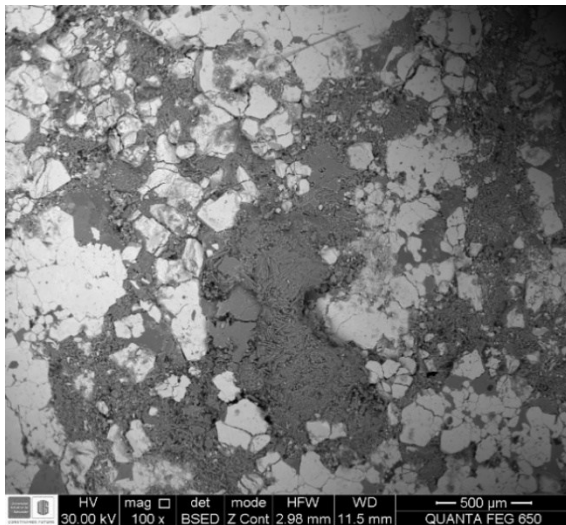
Cubo testigo presente en la columna NO1



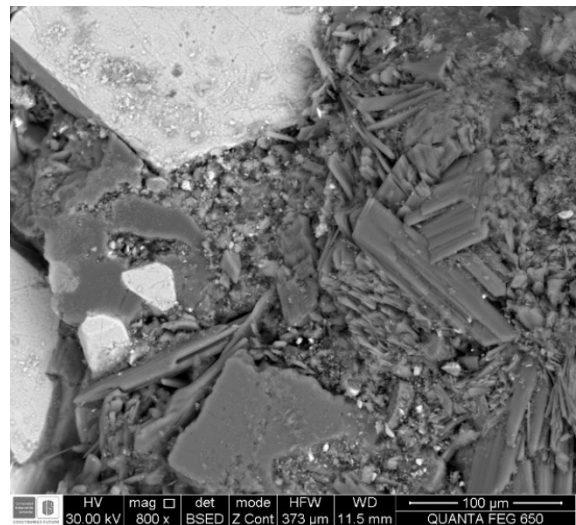
A)



B)



C)



D)

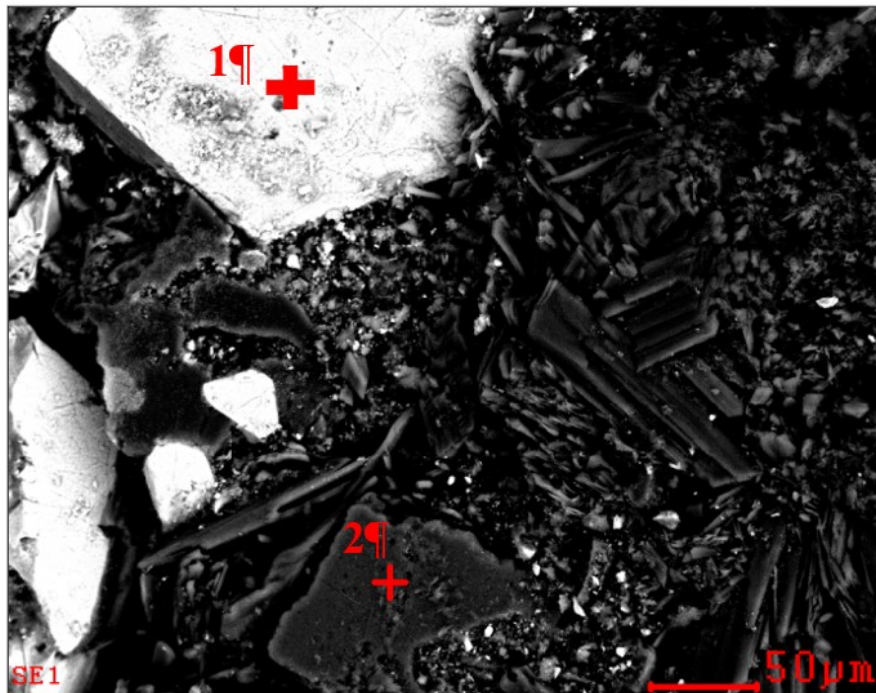
Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación. B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 20

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO1



1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	13.43	29.48
<i>OK</i>	14.86	24.49
<i>AlK</i>	00.33	00.32
<i>SiK</i>	00.48	00.45
<i>SK</i>	33.83	27.81
<i>KK</i>	00.43	00.29
<i>FeK</i>	35.47	16.74
<i>AsK</i>	01.17	00.41
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	14.06	24.97
<i>OK</i>	23.12	30.82
<i>MgK</i>	00.31	00.27
<i>AlK</i>	10.35	08.18
<i>SiK</i>	34.43	26.15
<i>SK</i>	00.39	00.26
<i>KK</i>	16.65	09.08
<i>FeK</i>	00.69	00.26
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

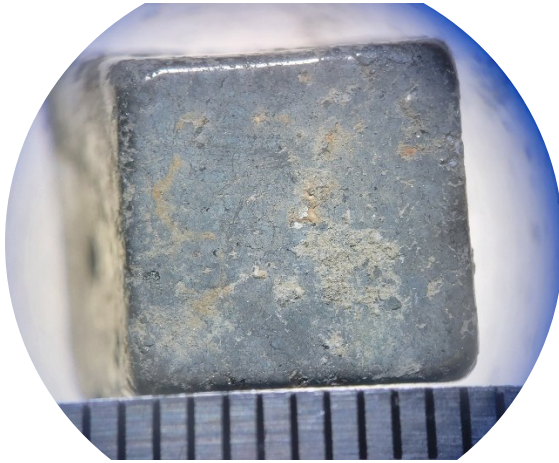
En la **Figura 21A**, se observa que el segundo testigo de pirita (columna NO2) presenta zonas extensas de coloración rojiza, que se definen como patinas de oxidación. El análisis SE (**Figura 21B**) permite evidenciar una topografía de levantamientos de poca área en zonas concretas, destacándose por bordeados irregulares. En el BSED (**Figura 21C**) se observa que casi toda la superficie corresponde a un mineral de alto número atómico y se evidencian pequeñas grietas rellenas con material con bajo número atómico. Con lo cual se definen dos fases minerales con comportamiento característico. En la **Figura 21D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual, visto en BSED, lo que permite ver más a detalle la presencia de las dos fases minerales.

En la **Figura 22** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 38.72% de S y 20.82% de Fe, con valores mínimos de O (5.03%). En contraste, el análisis del **Polígono 2** revela una composición compleja rica en O (48.79%), con picos mínimos de S (11.08%) y Ca (9.58%) además de trazas importantes de Fe (2.66%), Si (2.41%) y Al (1.58%), seguido de trazas no tan significativas de As, K y Mg.

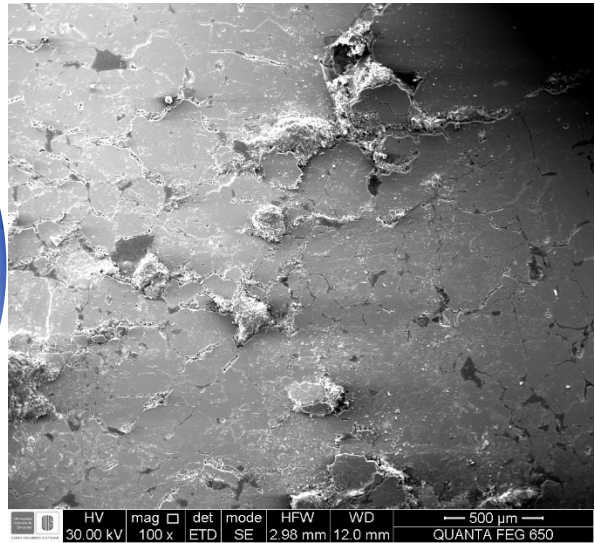
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 21

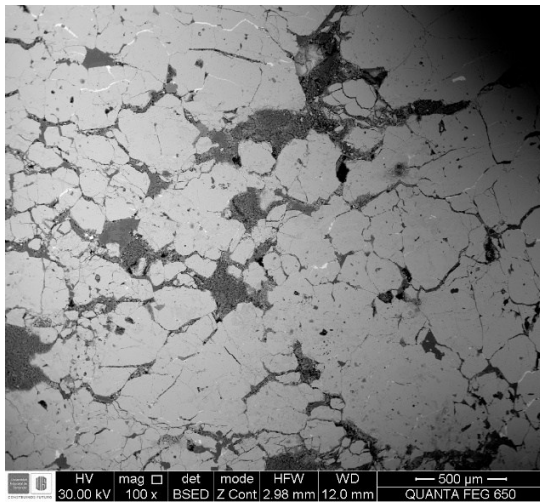
Cubo testigo presente en la columna NO₂



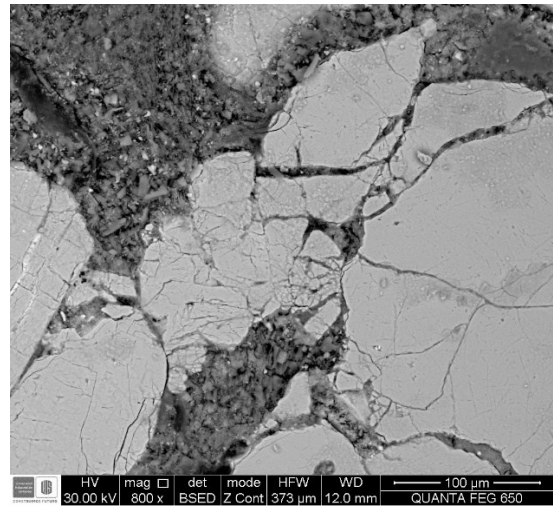
A)



B)



C)



D)

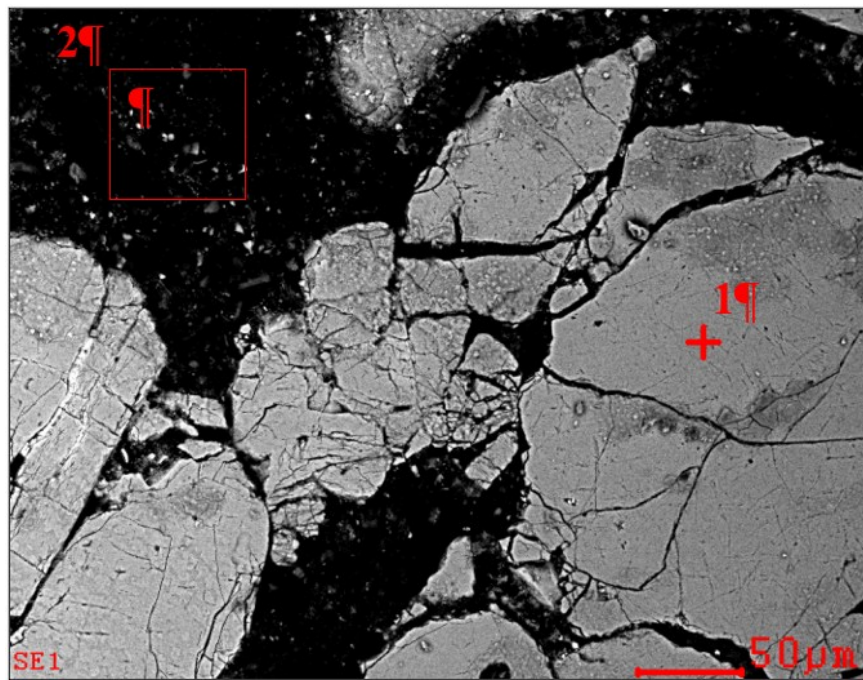
Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación. B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 22

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO2



2

1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	14.63	35.44
<i>OK</i>	02.76	05.03
<i>SK</i>	42.66	38.72
<i>FeK</i>	39.95	20.82
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	13.04	22.90
<i>OK</i>	37.00	48.79
<i>MgK</i>	00.09	00.08
<i>AlK</i>	02.02	01.58
<i>SiK</i>	03.21	02.41
<i>SK</i>	16.84	11.08
<i>KK</i>	00.78	00.42
<i>CaK</i>	18.19	09.58
<i>FeK</i>	07.06	02.66
<i>AsK</i>	01.76	00.50
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

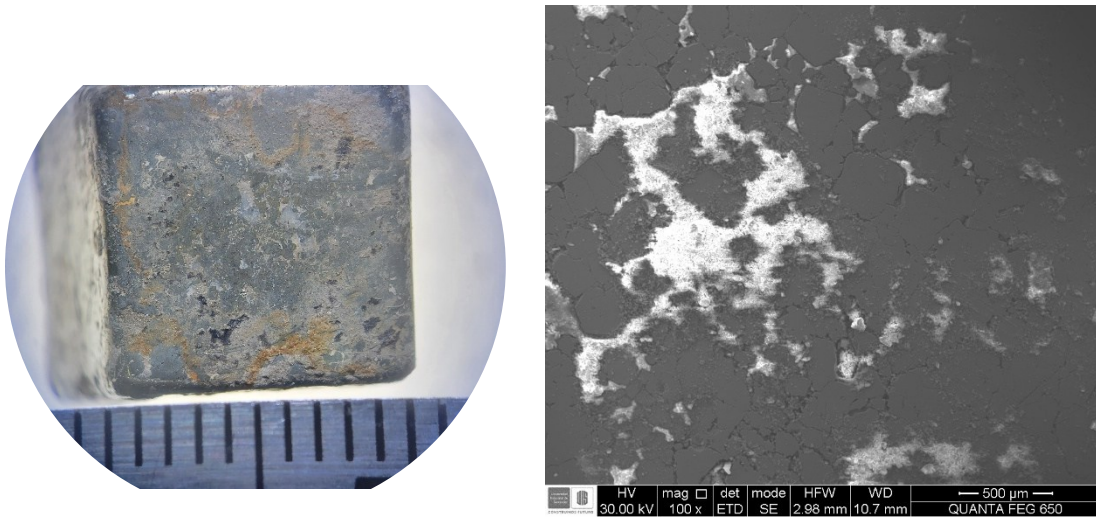
En la **Figura 23A**, se observa que el tercer testigo de pirita (columna NO₃) presenta patinas de oxidación rojizas, además de zonas visiblemente blanquecinas y de coloración oscura. El análisis SE (**Figura 23B**) permite ver una topografía relativamente normal con zonificaciones brillantes que indican un relieve mayor a la superficie del cubo, pero, sin observarse una irregularidad hacia los bordes, mostrando así un crecimiento de una película. En el BSED (**Figura 23C**) se ven dos grupos minerales, uno más extenso y brillante cubriendo casi el total de la superficie, siendo así un mineral pesado atómicamente, y una matriz en el crecimiento que mostraba mayor topografía, de color más gris, indicando minerales de bajo número atómico. En la **Figura 23D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual, visto en BSED, lo que permite ver más a detalle la presencia de los grupos minerales presentes.

En la **Figura 24** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirma el mineral de pirita con un 49.37% de S y 33.73% de Fe, además se resalta una cantidad importante de O (12.33%) y trazas elementales de Mg, Al, Si, K, Ca, As y Zn. En contraste, el análisis del **Polígono 2** revela una composición compleja rica principalmente en O (49.76%), Si (15.44%), S (11.70%), Fe (6.87%) y Al (5.16%). También se tienen en menor medida picos de Ca (2.99%) y trazas de Na, Mg, K, Cu, Zn y As.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

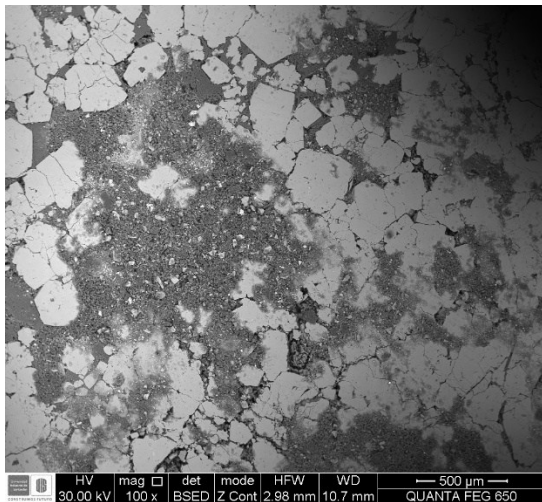
Figura 23

Cubo testigo presente en la columna NO₃

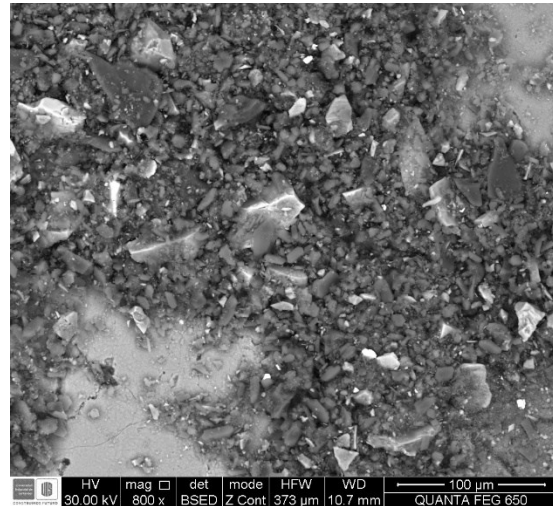


A)

B)



C)



D)

Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación.

B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en

Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

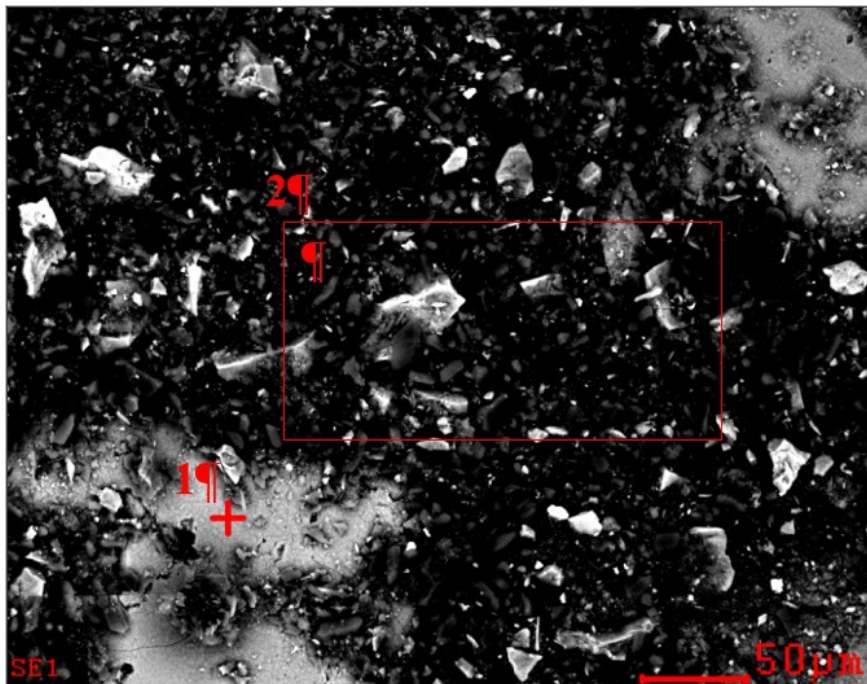
Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de

800X.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 24

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO3



1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.55	01.74
<i>OK</i>	05.20	12.33
<i>MgK</i>	00.04	00.06
<i>AlK</i>	00.36	00.51
<i>SiK</i>	00.98	01.32
<i>SK</i>	41.77	49.37
<i>KK</i>	00.21	00.21
<i>CaK</i>	00.21	00.20
<i>FeK</i>	49.70	33.73
<i>ZnK</i>	00.48	00.28
<i>AsK</i>	00.50	00.25
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.40	04.93
<i>OK</i>	32.30	49.76
<i>NaK</i>	00.53	00.57
<i>MgK</i>	00.48	00.49
<i>AlK</i>	05.65	05.16
<i>SiK</i>	17.59	15.44
<i>SK</i>	15.22	11.70
<i>KK</i>	00.79	00.50
<i>CaK</i>	04.86	02.99
<i>FeK</i>	15.56	06.87
<i>CuK</i>	00.46	00.18
<i>ZnK</i>	01.23	00.46
<i>AsK</i>	02.93	00.96
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

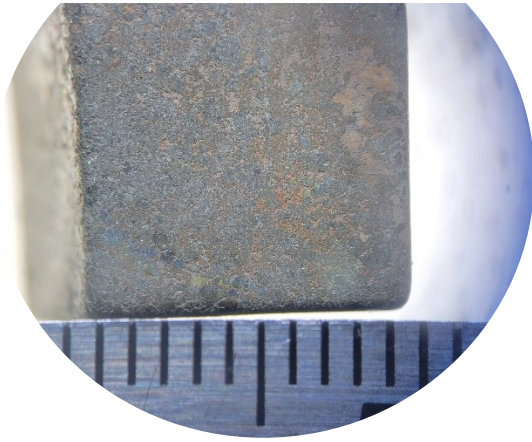
En la **Figura 25A**, se observa que el cuarto testigo de pirita (columna NO4) presenta casi la totalidad de su superficie con manchas o patinas de oxidación. El análisis SE (**Figura 25B**) permite evidenciar una topografía de alta porosidad y con relieve en un gran porcentaje del área de la superficie. En el BSED (**Figura 25C**) se observan dos grupos minerales, categorizados por sus diferencias en el número atómico; opaco más liviano, brillante más pesado. Esto permite definir la presencia de dos minerales diferentes, siendo el de mayor número atómico el que se encuentra en mayor medida. En la **Figura 25D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual, visto en BSED.

En la **Figura 26** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** indica la presencia de pirita con un 45.18% de S y 24.50% de Fe, además se observa una cantidad mínima de O (4.31%). En contraste, el análisis del **Punto 2** revela una composición compleja rica principalmente en O (50.08%) y Ca (14.30%), con cantidades mínimas de Mg (7.40%) y Fe (6.75%). También se tienen trazas de Mn, S y Pb. Por último, para el **Punto 3** muestra un pequeño cristal de sulfuro compuesto de S (30.38%), Cu (15.09%) y Fe (8.15%), indicando que posiblemente una calcopirita. Se tienen también cantidades mínimas de As (5.67%), y O (7.48%), además de trazas de Zn.

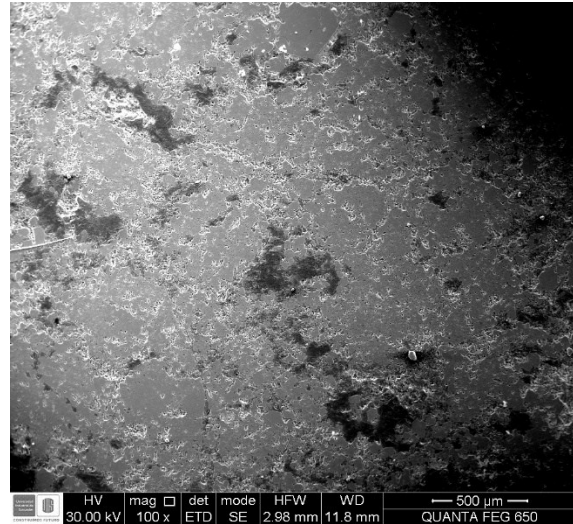
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 25

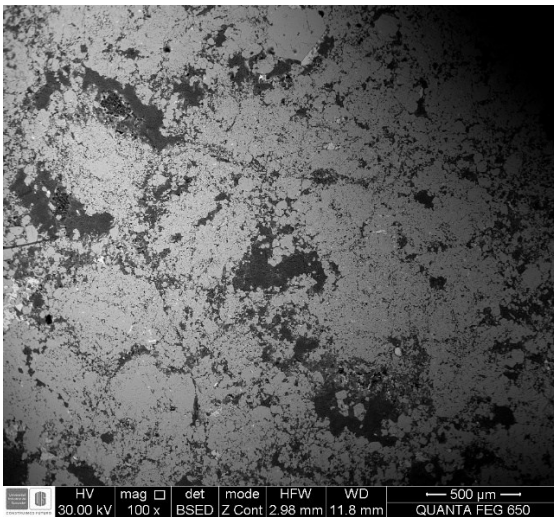
Cubo testigo presente en la columna NO4



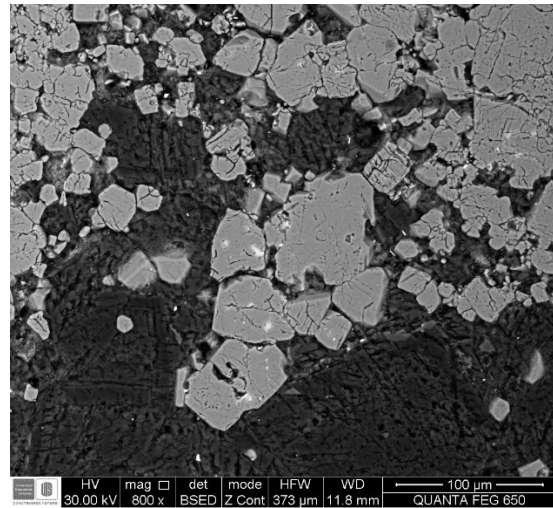
A)



B)



C)



D)

Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación.

B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en

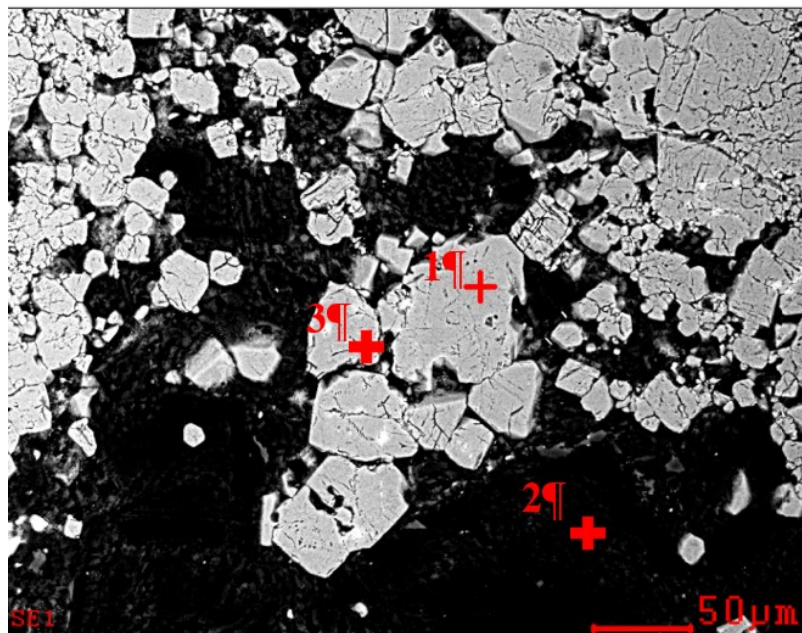
Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 26

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna NO4



2

1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	09.77	26.01
<i>OK</i>	02.16	04.31
<i>SK</i>	45.29	45.18
<i>FeK</i>	42.79	24.50
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	11.04	20.62
<i>OK</i>	35.71	50.08
<i>MgK</i>	08.02	07.40
<i>SK</i>	00.14	00.10
<i>CaK</i>	25.55	14.30
<i>MnK</i>	01.54	00.63
<i>FeK</i>	16.81	06.75
<i>PbL</i>	01.18	00.13
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

3

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	11.37	32.11
<i>OK</i>	03.53	07.48
<i>SK</i>	28.72	30.38
<i>FeK</i>	13.41	08.15
<i>CuK</i>	28.27	15.09
<i>ZnK</i>	02.17	01.13
<i>AsK</i>	12.53	05.67
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

En la **Figura 27A**, se observa que el cubo de pirita oxidado, usado como referencia frente a los testigos de las columnas oxidadas, presenta una coloración rojiza importante, indicando un crecimiento de las patinas de oxidación. El análisis SE (**Figura 27B**) permite evidenciar una superficie lisa, pero, con alta presencia de grietas y también levantamientos. En el BSED (**Figura 27C**) se categorizan los dos grupos minerales, gracias a sus diferencias de número atómico revelados por los minerales claros (alto número Z) y opacos (bajo número Z). En la **Figura 27D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual.

En la **Figura 28** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 57.62% de S y 31.63% de Fe, además se resalta la presencia de O (9.67%) y trazas elementales de As y Mg. En contraste, el análisis del **Punto 2** revela una composición compleja bastante rica en O (46.99%) y Ca (24.18%). También se tienen valores de Mg (11.27%), Mn (4.20%) y Fe (3.77%). Por último, se tiene una traza elemental de Mo.

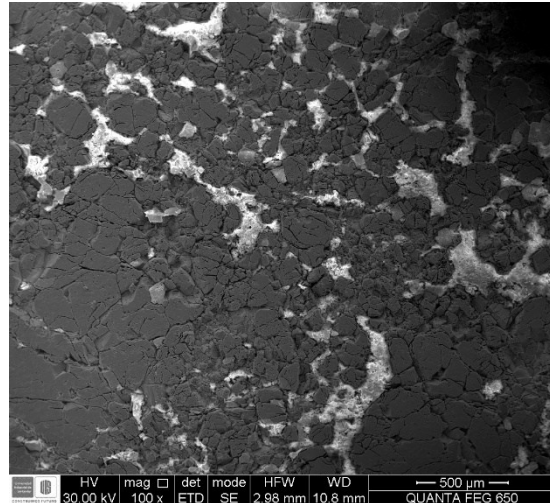
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 27

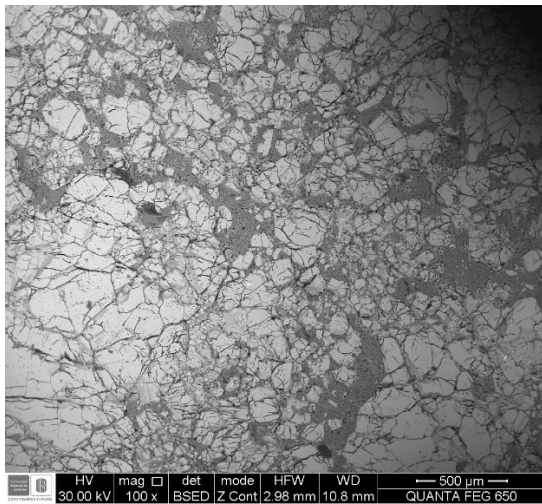
Cubo oxidado usado como referencia



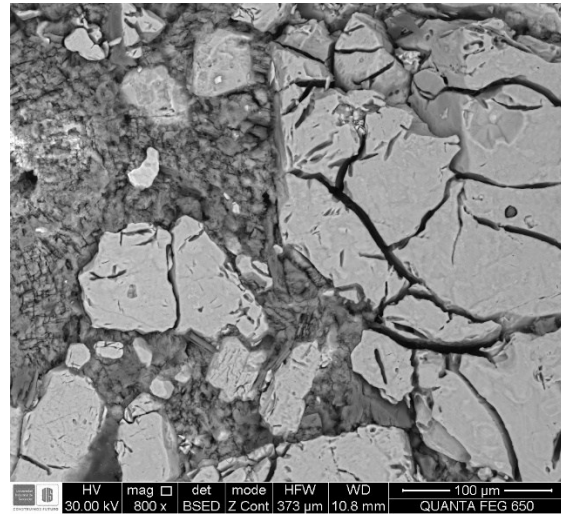
A)



B)



C)



D)

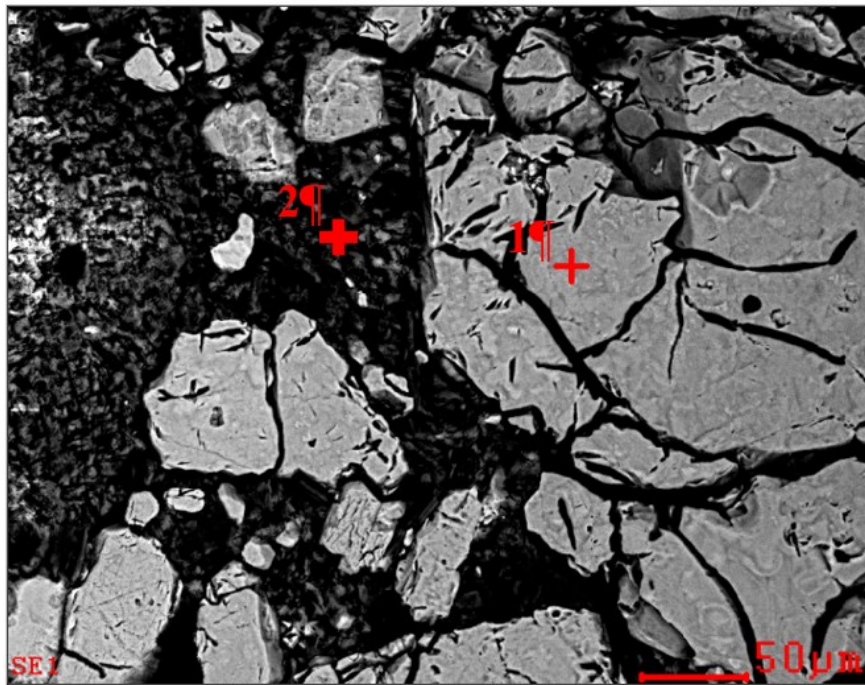
Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita oxidado usado como referencia respecto a los demás cubos. B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Electrones Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 28

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo oxidado



1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	04.03	09.67
<i>MgK</i>	00.09	00.15
<i>SK</i>	48.08	57.62
<i>FeK</i>	45.98	31.63
<i>AsK</i>	01.82	00.93
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	04.17	09.03
<i>OK</i>	28.93	46.99
<i>MgK</i>	10.54	11.27
<i>MoL</i>	02.07	00.56
<i>CaK</i>	37.30	24.18
<i>MnK</i>	08.88	04.20
<i>FeK</i>	08.11	03.77
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

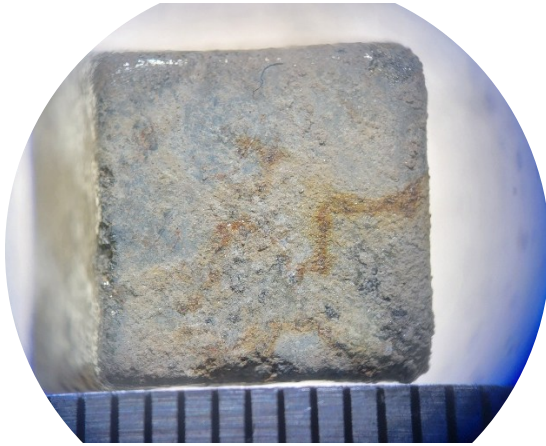
En la **Figura 29A**, se observa que el primer testigo de pirita (columna O1) tiene un número considerable de patinas de oxidación, además de tener una afectación bastante considerable. El análisis SE (**Figura 29B**) permite evidenciar una topografía muy irregular, con pequeños levantamientos y una textura bastante desigual, dando un aspecto aparente de “esponja”. En el BSED (**Figura 29C**) se ve una zona clara que cubre la mayoría de la superficie, con manchas opacas bastante considerables. Estas dos fases de color indican minerales de alto y bajo número atómico, respectivamente. En la **Figura 29D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual, visto en BSED.

En la **Figura 30** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 28.13% de S y 15.82% de Fe, además se resalta una cantidad importante de O (16.84%). En contraste, el análisis del **Punto 2** revela una composición con porcentajes de gran proporción de O (40.02%) además de tener S (15.18%) y Ca (15.98%), además de trazas de Fe. Para el **Punto 3** también se tiene un pequeño agregado de pirita con una composición de S (31.68%) y Fe (17.76%), con presencia de O (4.77%).

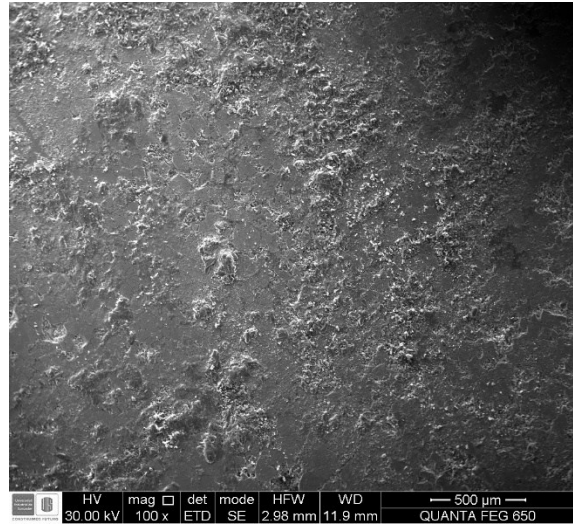
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 29

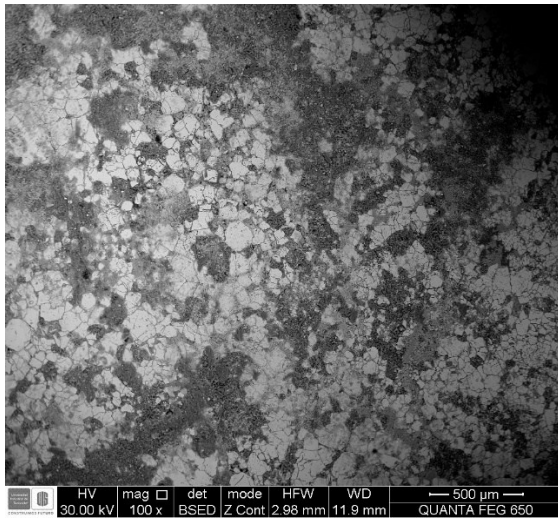
Cubo testigo presente en la columna O1



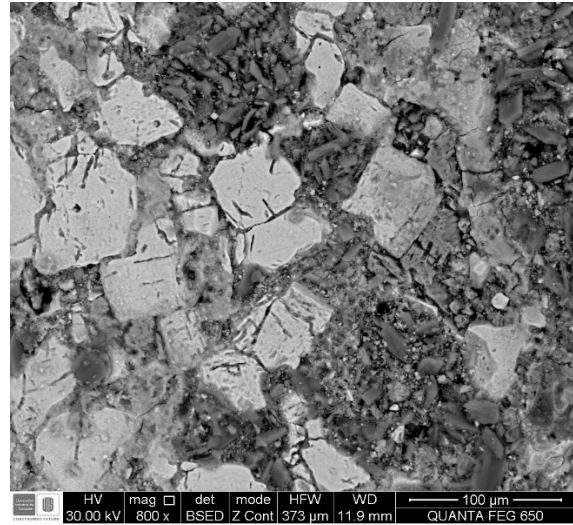
A)



B)



C)



D)

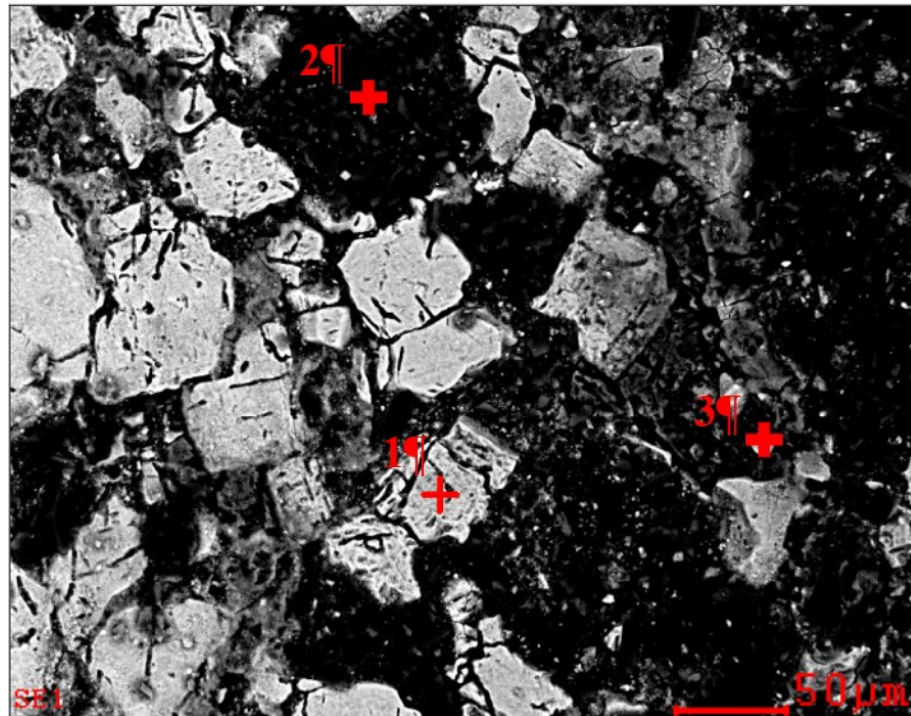
Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación. B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 30

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna O1



1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	18.64	39.21
<i>OK</i>	10.67	16.84
<i>SK</i>	35.70	28.13
<i>FeK</i>	34.99	15.82
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	15.87	28.26
<i>OK</i>	29.94	40.02
<i>SK</i>	22.76	15.18
<i>CaK</i>	29.94	15.98
<i>FeK</i>	01.48	00.57
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CK	20.88	45.79
OK	02.90	04.77
SK	38.56	31.68
FeK	37.65	17.76
Matrix	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

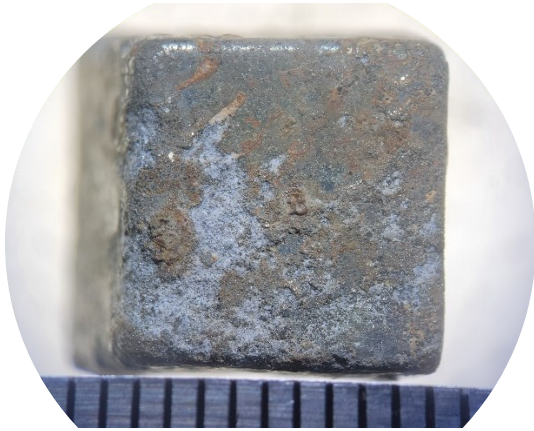
En la **Figura 31A**, se observa que el segundo testigo de pirita (columna O2) presenta oxidación considerable, pero, también se observa un crecimiento de una película blanca la cual recubre de manera notable la superficie. El análisis SE (**Figura 31B**) permite evidenciar una topografía lisa en gran parte de la superficie y zonificaciones con levantamientos considerables, que parecen actuar con una tendencia de crecimiento. En el BSED (**Figura 31C**) se observan los grupos minerales claros (alto número atómico) y opacos (bajo número atómico), entre mezclados, mostrando una tendencia a crecimiento de la matriz. En la **Figura 31D** se ve el acercamiento donde se realizó el EDS puntual.

En la **Figura 32** se presencian los resultados de EDS: El **Punto 1** confirman la presencia de pirita con un 59.84% de S y 31% de Fe, además se tiene una cantidad mínima de O (7.47%) y trazas elementales de Mg, Al y Si. En contraste, el análisis del **Punto 2** revela una composición compleja enriquecida en O (58.33%) y cantidades importantes de Si (19.48%) y Al (13.58%). También se observa una presencia mínima de K (3.82%) y Mg (1.59%) además de trazas importantes de Fe, Mo, Ti y Na.

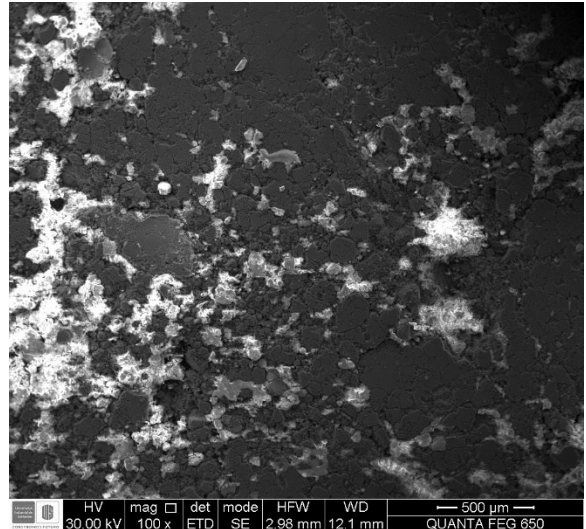
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Figura 31

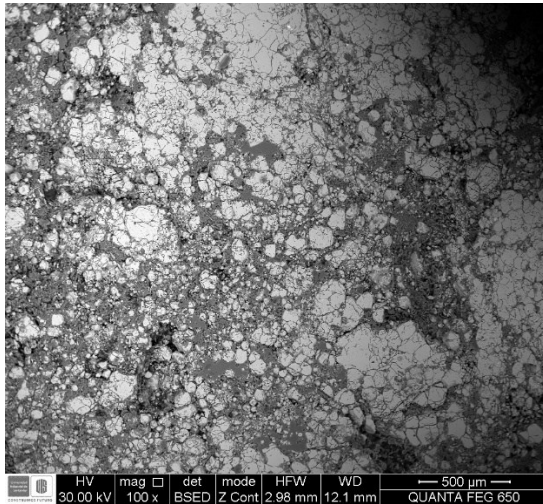
Cubo testigo presente en la columna O2



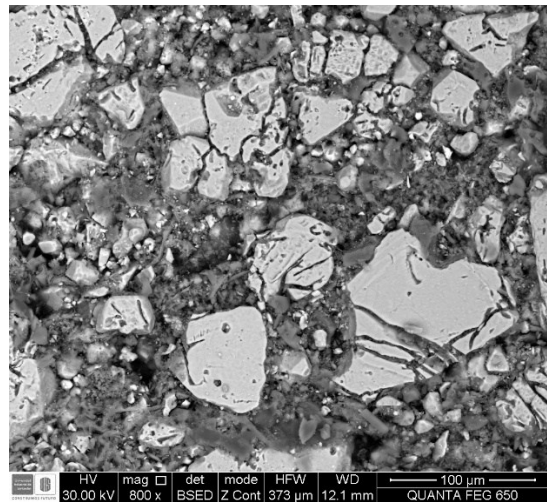
A)



B)



C)



D)

Nota. Notas. A) Vista en lupa del cubo de pirita usado como testigo en la columna de lixiviación.

B) Vista del MEB en Electrones Secundarios (SE) a un aumento de 100X. C) Vista del MEB en

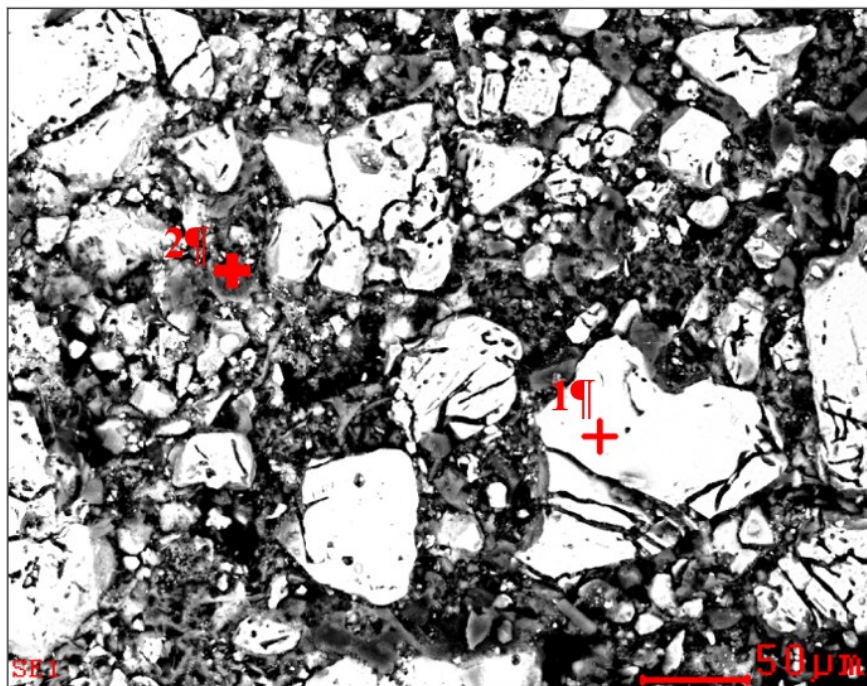
Electrones Retro dispersados (BSED) a un aumento de 100X. D) Vista del MEB en Electrones

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Retro dispersados (BSED) fijado en la zona donde se tomó el EDS y con un acercamiento de 800X.

Figura 32

Acercamiento de la toma EDS puntual para el cubo en la columna O2



2

1

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.39	01.23
<i>OK</i>	03.15	07.47
<i>MgK</i>	00.12	00.19
<i>AlK</i>	00.03	00.04
<i>SiK</i>	00.16	00.22
<i>SK</i>	50.54	59.84
<i>FeK</i>	45.61	31.00
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.26	02.22
<i>OK</i>	43.97	58.33
<i>NaK</i>	00.07	00.06
<i>MgK</i>	01.82	01.59
<i>AlK</i>	17.26	13.58
<i>SiK</i>	25.78	19.48
<i>MoL</i>	00.98	00.22
<i>KK</i>	07.04	03.82
<i>TiK</i>	00.16	00.07
<i>FeK</i>	01.68	00.64
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Nota. Imagen general del acercamiento y señalamiento puntual donde se tomó el EDS y sus respectivas tablas elementales.

5.4 Presencia de hierro con facilidad de solubilidad en el relave post experimental en función de los tratamientos usados

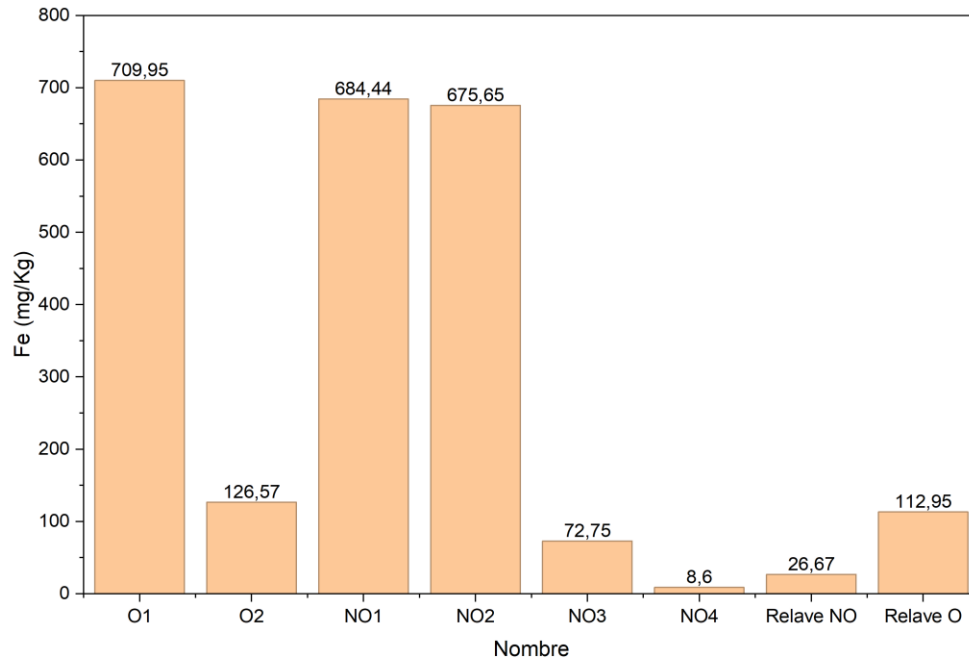
El parámetro de la solubilidad del hierro indica que tan contaminante puede resultar el relave tras ser meteorizado, esto, en función de los miligramos de hierro soluble por cada kilogramo de relave. Los valores altos de hierro tras una medición, indican la inestabilidad geoquímica del relave reflejando la mínima capacidad de inmovilización de este metal y por ende mostrando la facilidad de liberación de hierro ante la saturación de agua. La liberación de hierro demuestra la posible movilización de otros metales, incluso más riesgosos, ocasionando la contaminación de fuentes de agua y suelos.

En la **Figura 33** se observa que, para las columnas oxidadas, se tienen valores de 709.96 mg/Kg para el control (O1) y de 126.57 mg/Kg para el tratamiento con BlackDiamond (O2). Para las columnas no oxidadas, el control (NO2) tiene un valor de 675.65 mg/Kg y las columnas en las que se usó un tratamiento tuvieron valores de; BlackDiamond (NO1) 684.44 mg/Kg, BlackDiamond duplicado (NO3) 72.75 mg/Kg y SM6 (NO4) 8.6 mg/Kg. Estos resultados muestran que los valores más altos se tuvieron para la columna oxidada de control (O1), la columna no oxidada con BlackDiamond (NO1) y la columna no oxidada de control (NO2).

Para los valores obtenidos del material (relave) se tuvo al no oxidado con valores de 26.67 mg/Kg y el oxidado con 112.95 mg/Kg. Esto muestra que el material oxidado tuvo el valor más alto de hierro.

Figura 33

Valores de Fe soluble en mg/Kg medido en el material solido de las columnas y el relave original



Nota. Se muestra los valores respectivos de la solubilidad del Fe en el relave original y respectivamente cada columna post experimento.

6 Discusión

Tras el análisis del microscopio electrónico de barrido (MEB) y el uso de técnicas de rayos x (DRX y FRX), se definió de manera general, que los minerales identificados más comunes, son el cuarzo y la pirita, como se resume en la **Tabla 4** y la **Figura 12** para el material no oxidado, y en la **Tabla 5** y la **Figura 13** para el material oxidado.

A través del MEB y tras el microanálisis EDS, el proceso de oxidación realizado para el material adecuado se evidenció por la alta presencia de hierro y oxígeno en los minerales de pirita, además, los bajos porcentajes de azufre en muestras con minerales de zinc y la presencia de plomo

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

ligado a posibles sulfatos nos indica un resultado positivo en la meteorización acelerada causada por el proceso de oxidación. La literatura menciona este proceso, explicando como el azufre abandona la estructura mineral y permite la entrada masiva de oxígeno convirtiendo el hierro y el arsénico en óxidos estables; mientras otros elementos como el plomo, tienden a estabilizarse de forma natural en fases de sulfato para el material oxidado (Parbhakar-Fox y Lottermoser, 2016).

A partir del DRX y el FRX, el proceso de oxidación reflejó valores relevantes que permitieron definir su efectividad. En el DRX del material no oxidado y oxidado observado en la **Figura 12** y la **Figura 13** respectivamente, se observa la disminución de la pirita y tras validar el FRX en la **Tabla 6** y **Tabla 7** se observa una estabilidad del hierro, 14.6% para el material no oxidado y 14.62% para el material oxidado, y, un aumento del azufre 5.43% en el material no oxidado frente a 5.77% en el material oxidado, mostrando una discrepancia frente a la disminución de la pirita remarcada en el DRX. Estudios reportan que esta discrepancia se debe a la variación en los estados de oxidación del hierro y del azufre causando dichas diferencias de tendencias minerales y elementales entre el DRX y FRX (Loubser & Verryyn, 2008). Esto demuestra la efectividad final en el proceso de oxidación.

Los valores de pH para las columnas oxidadas (**Figura 14**) mostraron un rango general menor a 4: este rango se considera crítico en el proceso de oxidación en sulfuros, en este caso concreto para la pirita, esto ocasionado por el aumento de Fe^{3+} (hierro férrico) el cual se convierte en el principal oxidante, con una reacción de 2 a 3 órdenes de magnitud más rápida que la reacción ocasionada por el oxígeno (GARD Guide, 2024). Teniendo en cuenta esto y comparando la columna O1 (Control) con la O2 (BlackDiamond), se tiene que el uso del tratamiento mostró un aumento del pH respecto al control, pero en general, debido a los valores tan bajos de pH, el proceso de oxidación ya se encontraba en un estado avanzado.

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Tras analizar los valores de pH de las columnas no oxidadas (**Figura 15**) antes de la interrupción de los riegos, el uso de los tratamientos (NO1, NO 3 Y NO4) tuvieron un incremento del pH respecto al control (NO2); esto demostró que el uso del BlackDiamond y SM6 accionaron e impidieron la oxidación y por ende la formación de un DAM, teniendo en cuenta que para las columnas con BlackDiamond (NO1 y NO3) funcionó mejor a mayor cantidad de aditivo, como lo fue el BlackDiamond duplicado (NO3), y para el SM6, se mantuvo una estabilidad del pH durante todo el experimento.

El BlackDiamond tiene su origen en la leonardita, la cual es rica en ácidos húmicos y fúlvicos, donde la literatura reporta que estos poseen una gran densidad de grupos oxigenados los cuales tienen una tendencia de absorción rápida sobre los sitios activos de la pirita, tras su interacción con átomos de hierro superficiales, esto genera una barrera o película orgánica que bloquea de manera física el paso de oxígeno (O) y del ion férrico (Fe^{3+}), los principales oxidantes en un entorno minero (Zheng et al., 2019). La literatura reporta, que esta barrera de ácidos húmicos presenta un gran desafío y es la degradación ocasionada por la catálisis biológica, principalmente por las bacterias como *A. ferrooxidans*, las cuales han logrado mecanismos para debilitar la capa húmica utilizando sustancias poliméricas extracelulares (EPS) (Yang et al., 2018), con lo que esto pudo haber condicionado el experimento de este trabajo, aunque no se tenga la certeza al no haber medido la actividad bacteriana. Se debe tener en cuenta que el SM6 forma geles gracias a los alginatos, además, que debido a la presencia de florotaninos funciona de manera antimicrobiana, pudiendo afectar la actividad de las bacterias acidófilas, encargadas de la catálisis (Yabur et al., 2007; Casey et al., 2026).

La oxidación se mantuvo en acción durante los riegos, además, que, tras la interrupción de estos se tuvo una caída importante del pH mostrando así un cambio en la velocidad de la oxidación

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

y por ende la producción de acidez. Este cambio se da, ya que tras la interrupción del suministro de agua se mantiene una humedad mínima, la cual sumada al oxígeno causa que se almacene acidez en la superficie de los minerales y los poros de las rocas, aunque no haya un flujo de agua que lo transporte al medio. El producto de esta acidez se le conoce como eflorescencias salinas o Minerales Generadores de Acidez (MGA) que son sulfatos e hidroxisulfatos de Fe con Al, Zn, Cu, Cd y otros. Al ocurrir un aumento del caudal y por ende del nivel del agua, estos minerales altamente solubles se liberan al medio aumentando de manera drástica la acidez que se almacenó (Aduvire, 2006).

Teniendo en cuenta las características respectivas de los aditivos, para antes del tiempo seco actuaron inhibiendo la oxidación y con una marcada diferencia en su eficacia entre cada uno, siendo el BlackDiamond duplicado, el que mostró un mejor resultado reflejado en los valores de pH, pero, tras el tiempo seco y por la acidez acumulada se reflejó una disminución marcada del valor del pH. Para el tratamiento con SM6, al presentarse un pH superior a 5, la formación de geles funcionó evitando la difusión del oxígeno, manteniendo la estabilidad geoquímica de la pirita, evitando su tendencia a la oxidación en la fase temprana de generación del DAM.

Es relevante mencionar que las bacterias como la *A. ferrooxidans* cumplen un papel importante funcionando como catalizadoras biológicas, pero, además la literatura habla de que tienen la capacidad de fagocitar la capa de ácidos húmicos, causando que luego de alcanzar la superficie del mineral y reanudar la oxidación, lleven a que esta pueda aumentar drásticamente de un 1.6% al 67.9% en pocos días (Yang et al., 2018).

Para los valores de conductividad eléctrica en las columnas oxidadas (**Figura 14**) se observó como aumenta drásticamente tras el tiempo seco. Una de las razones es por la formación de MGA los cuales al ser sulfatos y altamente solubles en agua, tras la reanudación de los riegos

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

causan una saturación de sales en los lixiviados, causando que de tener valores en un rango de 2000 a 7500 μS se hayan tenido lecturas de 7000 a 12000 μS . Aunque también se debe tener en cuenta que tanto el BlackDiamond como el SM6, presentaban altas conductividades eléctricas por las sales presentes en estos, siendo respectivamente de 12800 μS y 26930 μS . Para las columnas no oxidadas (**Figura 15**), los valores de conductividad eléctrica se mantuvieron similares para antes y después del periodo sin riegos, pero resaltando los valores del tratamiento con SM6 (NO4) el cual presentó un rango notablemente más alto que los demás tratamientos (27000 a 32000 μS), esto debido a su alto enriquecimiento en nutrientes y a su alta solubilidad en agua (>99%) (Shukla et al., 2019).

En el análisis del Fe presente en los lixiviados se observó una notable diferencia entre las columnas oxidadas y no oxidadas. En las oxidadas (**Figura 16**) la columna control mostró valores entre 96 y 162 mg/L hasta antes de la interrupción de los riegos. Después de este tiempo caracterizado como seco, estos valores aumentaron sobre 890 mg/L, teniendo el valor más alto (1098.35 mg/L) en el control oxidado (O1) para la semana 12. Teniendo en cuenta que el material en cuestión tuvo un proceso de oxidación, la alta presencia de hierro refleja una etapa avanzada de oxidación en la que debido al pH bajo (<3) resaltado anteriormente, el Fe no logra precipitar manteniéndose disuelto como iones Férricos (Fe^{3+}) (Aduvire, 2006). Quienes bajan al lixiviado; frente a esto se tiene la columna oxidada con BlackDiamond (O2) la cual tiene valores de Fe mucho menores para la última semana (233.89 mg/L), mostrando que el uso del aditivo mermó notablemente la acción química de oxidación evitando el aumento de iones Férricos.

El Fe disuelto en las columnas no oxidadas (**Figura 16**) presentó valores bajos en las semanas antes de la interrupción de los riegos indicando una tasa de oxidación lenta en la que la liberación de iones Férricos fue mínima. Teniendo en cuenta el hierro en el BlackDiamond (2731

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

mg/L) y el SM6 (53.5 mg/L), los valores más altos de hierro para estas semanas iniciales se pueden deber al contenido de este elemento de manera intrínseca en cada uno de los aditivos. Esta hipótesis se refleja mejor para la semana 12, donde la columna control (NO2) presentó un valor de hierro disuelto de 102 mg/L y la columna con BlackDiamond (NO1) tuvo 896 mg/L; este valor tan alto para la semana 12, también se puede deber a que la cantidad de BlackDiamond aplicada no sea suficiente. Esto se plantea teniendo en cuenta que los ácidos húmicos y fúlvicos funcionan como quelantes atrapando el hierro y formando complejos organometálicos que son solubles en agua (Vargas et al., 2016; Zingaretti et al., 2017), causando que, tras un debilitamiento de la capa de ácidos húmicos por disminución drástica del pH o la posible acción bacteriana indeseable (Yang et al., 2018), se diese liberación de cantidades mucho más altas de hierro.

Las superficies de los cubos de referencia y los testigos de cada columna, mostraron información concisa sobre afectaciones en su superficie, la mineralogía y la pérdida de Azufre, un indicador importante de la oxidación de la pirita. Para el análisis de las imágenes SE se revisó la presencia de Etch Pits (Picaduras), los cuales son hoyos de corrosión que indican ataques químicos/biológicos (Liu et al., 2003). En las imágenes BSED se diferenció la superficie de la pirita, más brillante (Z alto) de posibles productos de oxidación, más opacos, además de tener en cuenta el espesor de estos hacia el borde de la superficie de pirita, ya que, a menor espesor, indica la interrupción de la difusión del oxígeno hacia el núcleo del mineral (Mahoney et al., 2019). Para esto se tuvo en cuenta la relación estequiométrica Fe/S, considerando su ratio (%) en donde la pirita se catalogó como “prístina” ($Fe:S < 1$) y depletada debido a la pérdida de Azufre ($Fe:S > 1$) (Mahoney et al., 2019).

En la **Figura 17**, se observa la imagen SE del cubo sin oxidar, donde se destaca su superficie notablemente lisa, con agregados que se ven como levantamientos. Para su imagen

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

BSED se observa una superficie brillante sin alteraciones y manchas concretas más opacas, pero que no crecen hacia los núcleos minerales, indicando así que se tratan de matrices de minerales de bajo número atómico. Respecto a los testigos de las columnas no oxidadas, para el testigo de la columna control (NO2) **Figura 21**, la imagen SE muestra una superficie bastante brillante lo que indica alta rugosidad y afectación durante la oxidación. En la imagen BSED se observa la superficie de pirita (brillante) con bordes opacos, además de que estas manchas opacas muestran un crecimiento hacia el núcleo mineral de la superficie del sulfuro. Para los cubos de las columnas NO1 y NO3 (BlackDiamond y BlackDiamond duplicado) en las **Figura 19** y **Figura 23**, las imágenes SE muestra una superficie lisa con levantamientos topográficos que simulan una escama; esto indica el crecimiento de una película o adhesión del aditivo mostrando así la eficiencia en la creación de una capa aislante para la superficie de la pirita. En las imágenes BSED se valida la presencia de estos crecimientos compuestos por elementos de menor número atómico que el hierro de la pirita. Respecto a la columna no oxidada tratada con SM6 (NO4) de la **Figura 25**, se visualiza la imagen SE corroída con notables Etch Pits y porosidad. Para la imagen BSED se observa la superficie de la pirita con puntos o pequeñas zonas opacas dentro de cada mineral indicando productos de oxidación que no tuvieron un crecimiento posterior.

Para el cubo oxidado de referencia, **Figura 27**, la imagen SE muestra una superficie de características topográficas planas y levantamientos, donde, además se evidencian grietas notables. En la imagen BSED se observa una superficie mayormente brillante, con pequeñas manchas de menor brillo, sin llegar a ser opacas del todo, esto puede ser ocasionado por pequeños productos de oxidación que no han tenido un crecimiento muy relevante. En los cubos de las columnas oxidadas, se observa que para O1 (Control) **Figura 29**, la imagen SE muestra puntos brillantes, que indican irregularidades topográficas de levantamientos, además de verse depresiones que

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

muestran cierto grado de porosidad, dando así una imagen clara de afectación de la superficie del cubo, causada por la oxidación. En la imagen BSED se observa un crecimiento y una invasión opaca, que refleja productos de oxidación, sobre las zonas más brillantes, las cuales indican la superficie de pirita. Para la columna O2 (BlackDiamond) **Figura 31**, la imagen SE refleja una topografía lisa con levantamientos concretos, en general se ve considerablemente menos afectada que el cubo de la columna O1. Para la imagen BSED se observa la superficie de pirita (zona brillante) con zonas opacas en sus bordes, pero sin mostrar aparentes crecimientos hacia los núcleos minerales.

De manera general teniendo en cuenta que la pérdida de Azufre no fue tan notable en los cubos; se tuvo en cuenta que los valores más cercanos a 1 junto a los picos más altos de oxígeno, indicaron una mayor oxidación de la pirita.

Respecto a lo analizado a través del EDS para los cubos de referencia se compiló y resumió la información en la **Tabla 8**, teniendo en cuenta su relación Fe/S y picos de Oxígeno.

Tabla 8

Relación de Fe/S y oxígeno presente en los cubos usados como referencia a partir de los resultados obtenidos del MEB en el análisis EDS

Cubo de referencia	Fe/S (%)	O (%)
Oxidado	0.55	9.67
Sin Oxidar	0.53	18.64

Para el análisis EDS de los cubos testigos de cada columna se realizó la **Tabla 9** que resume las relaciones de Fe/S y oxígeno en estos.

Tabla 9

Relación de Fe/S y oxígeno presente en los cubos usados como testigos de acuerdo a los resultados obtenidos del MEB en el análisis EDS

Columna y tratamiento	Fe/S (%)	O (%)
Oxidada Control (O1)	0.56	16.84
Oxidada BlackDiamond (O2)	0.52	7.47
No Oxidada BlackDiamond (NO1)	0.6	24.49
No Oxidada Control (NO2)	0.54	5.03
No Oxidada BlackDiamond Duplicado (NO3)	0.68	12.33
No Oxidada SM6 (NO4)	0.54	4.31

Los resultados en conjunto del EDS muestran que, en las columnas oxidadas, el uso de BlackDiamond mantuvo mejor conservada la pirita, respecto a la columna control, tras evitar la pérdida de azufre por oxidación; la diferencia entre los picos de oxígeno también nos ayuda a validar esto, al mostrar que la columna de control presenta un valor mayor a la del tratamiento. Para las columnas no oxidadas ocurre algo contrario y es que las columnas que se trataron con BlackDiamond (NO1 y NO3), la relación Fe/S fue notablemente mayor a la de la columna control (NO2), además de mostrar valores más altos de oxígeno. Esto se podría deber a un proceso ajeno a la oxidación y relacionado a la capacidad de quelación de los ácidos húmicos, los cuales forman complejos organometálicos que retienen el hierro (Vargas et al., 2016; Zingaretti et al., 2017), y pueden facilitar la lixiviación del azufre causando este aumento en la relación Fe/S.

En la **Figura 33** se observan los valores de hierro soluble medidos en el relave original y en el material de cada columna al finalizar el experimento. Se observa que los valores más altos de hierro se encuentran en los controles de la columna oxidada y no oxidada, O1 y NO2, respectivamente, teniendo un rango de 675 a 710 mg/Kg, mostrando así la ocurrencia de la

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

oxidación y la gran capacidad de liberación de hierro en el relave tanto oxidado y no oxidado sin tratamiento.

Para los tratamientos se resalta la columna no oxidada con BlackDiamond (NO1), la cual tuvo valores muy altos de hierro, reflejando un comportamiento similar al del análisis de los lixiviados, ocurriendo por el posible contenido intrínseco de hierro en el aditivo o por sus propiedades quelantes. Respecto a los demás tratamientos se observa una disminución considerable de este aporte al relave de cada columna, mostrando un mejor resultado el SM6, con un valor de 8.6 mg/Kg. Además, y como comparación de los procesos de las columnas, se tuvieron en cuenta los valores del relave oxidado (112.95 mg/Kg) y no oxidado (26.67 mg/Kg), mostrando la tendencia de aumento de estos en los controles respectivos tras el experimento.

Los valores de hierro soluble en el suelo, no se encuentran regulados en Colombia, pero se tiene que fue propuesto como nivel de referencia un valor de 120 mg/Kg, para un área no intervenida (Briceño et al., 2020). Esto muestra que los tratamientos con BlackDiamond duplicado y SM6, funcionaron para mantener los valores de hierro en suelo, por debajo del límite teórico.

Los aditivos utilizados en este trabajo experimental muestran resultados positivos, reflejados principalmente en los parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad eléctrica) y los valores de hierro en los lixiviados y los que se transfirieron al suelo. Los cubos usados como testigos, se anclan hasta cierto grado a estos resultados, pero presentan algunas diferencias importantes en los testigos de las columnas no oxidadas con el tratamiento con BlackDiamond, reflejando la posibilidad de que este aditivo sea más efectivo remediando un medio en una etapa crítica de generación de un DAM que previniendo el estado de oxidación en su etapa inicial, a diferencia del SM6, el cual demuestra funcionar mejor en una etapa inicial. Además, esto también nos ayuda a postular la idea, de que, usando estos aditivos, o sus compuestos principales (ácidos

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

húmicos, fúlvicos, alginicos y florotaninos) en cantidades mayores y en conjunto, podrían mostrar una efectividad mayor en la inhibición de la oxidación para la pirita.

7 Conclusiones

- Se determinó que los tratamientos de BlackDiamond (ácidos húmicos y fúlvicos) y de SM6 (ácidos algínicos y florotaninos), muestran una clara eficacia para mitigar la formación de Drenaje Ácido de Mina (DAM), previniendo la oxidación de la pirita, pero con desempeños distintos según el estado de oxidación del material. El SM6 demostró una mayor capacidad preventiva en etapas tempranas al mantener la estabilidad geoquímica y el pH por encima de niveles críticos, mientras que el BlackDiamond mostró un potencial relevante en la remediación y protección de minerales en relaves con procesos de oxidación ya avanzados.
- El estudio validó que la inhibición de la oxidación ocurre por procesos físicos y químicos específicos: El BlackDiamond actúa mediante la formación de una película orgánica de ácidos húmicos y fúlvicos que bloquea el acceso de los principales agentes oxidante (O_2 y Fe^{3+}) a los sitios activos de la pirita. El SM6 opera a través de la encapsulación por geles de alginato que sellan la porosidad del relave. Además, se menciona en la literatura que sus compuestos de florotaninos funcionan como antimicrobianos, lo que podría mermar la catálisis biológica.
- Los análisis mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (SE/BSED) y EDS, confirmaron que los aditivos preservan la integridad física de los sulfuros. Mientras los controles presentaron una degradación marcada con presencia de *etch pits* y una relación Fe/S cercana a 1 (depleción de azufre), los granos tratados con BlackDiamond

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- exhibieron una capa protectora tipo "escama" y los tratados con SM6 mostraron una porosidad reducida, limitando el crecimiento de productos secundarios de oxidación.
- Se concluye que la interrupción de los riegos es un factor crítico que acelera la generación de acidez. La acumulación de Minerales Generadores de Acidez (MGA) y eflorescencias salinas durante el tiempo seco provoca una liberación drástica de sales y protones (H^+) al reanudarse el flujo hídrico, lo que se reflejó en los picos de conductividad eléctrica y caídas de pH observados en la semana 12.
 - El uso de los tratamientos, específicamente el SM6 y la dosis duplicada de BlackDiamond, logró mantener la transferencia de hierro al suelo por debajo del límite de referencia propuesto de 120 mg/Kg. Esto demuestra que la aplicación de estos aditivos no solo mitiga la acidez de los lixiviados, sino que reduce significativamente la carga contaminante metálica que migra hacia los perfiles inferiores del suelo.
 - Los resultados sugieren que el uso combinado de compuestos orgánicos (ácidos húmicos) y extractos algales (alginatos y antioxidantes) podría potenciar la inhibición de la oxidación de la piritita en relaves provenientes de procesos metalúrgicos como concentración gravimétrica y de molienda. Se postula que mayores dosis o la integración de ambos aditivos podrían superar desafíos como la posible degradación biológica de la capa húmica, ofreciendo una solución más robusta para la gestión de relaves mineros sulfurados.
 - Se propone que el experimento se realice durante un rango temporal mayor, con la intención de obtener más información del comportamiento químico e incluso biológico permitiendo así lograr una pasivación total del medio.

Referencias bibliográficas

- Abfertiawan, M. S., Palinggi, Y., Syafila, M., Handajani, M., & Pranoto, K. (2023). The comparison of 7.5 and 15% hydrogen peroxide as oxidizing agent in static tests of acid mine drainage potential in Indonesia [Comparación entre el peróxido de hidrógeno al 7,5% y al 15% como agente oxidante en ensayos estáticos sobre el potencial de drenaje ácido de minas en Indonesia]. *Heliyon*, 9(8), e18687. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18687>
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente*, 140.
- Aduvire, O. (2018). Técnicas de prevención y control de la generación acida en minería. *REVISTA DE MEDIO AMBIENTE MINERO Y MINERÍA*, 24. http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000100003&script=sci_arttext&tlng=es
- 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]. (E2242-21). <https://store.astm.org/e2242-21.html>
- Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Segeo, D. C., Smith, L., & Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry [Hidrogeología y geoquímica de las rocas estériles]. *Applied Geochemistry*, 57, 140-156. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.020>

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- Asesorías Técnicas Geológicas. (2020). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2776>
- 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. <https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- Borie, C. (2021). Columnas de lixiviación, una excelente herramienta para evaluar la movilidad de los contaminantes provenientes de botaderos y suelos afectados por la actividad minera. *AGQ Labs Chile*. <https://agqlabs.cl/2021/01/14/columnas-de-lixiviacion-contaminacion-mineria/>
- Briceño, J., Armado, A., Sequera, Á., & Niño-Ruiz, Z. (2020). ESTIMACIÓN DE NIVELES DE FONDO y NIVELES DE REFERENCIA PARA HIERRO, MANGANESO, NÍQUEL y ZINC EN SUELOS DE UN ÁREA NO INTERVENIDA ANTROPOGÉNICAMENTE. *Revista de Investigación Talentos*, VII(1)
- Bureau of Mining Regulation and Reclamation, Nevada Division of Environmental Protection. (1990). Meteoric Water Mobility Procedure [Procedimiento de movilidad del agua meteórica].
- Cadena, C. (1988). Recuperación de oro de las arenas de la mina san-José: método de cianuración por agitación (Tesis de pregrado). Escuela superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/32506>

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- Cartagena David, M. I. (2019). Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008-2018. (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13927>
- Casey, A., Boland, T. M., Kelly, A. K., McKay, Z. C., Markiewicz-Keszycka, M., Mirzapour-Koudash, A., Garcia-Vaquero, M., Balakrishnan, S., Guinan, K. J., O'Sullivan, J. T., & Vigers, S. (2026). Evaluation of *Ascophyllum nodosum* extract supplementation on feed degradability, ruminal fermentation and methane production using the rumen simulation technique (RUSITEC) [Evaluación de los efectos de la suplementación con extracto de *Ascophyllum nodosum* sobre la degradabilidad del pienso, la fermentación ruminal y la producción de metano mediante la técnica de simulación ruminal]. *PLoS ONE*, *21*(3), e0344019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0344019>
- Decreto 1076 de 2015 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015.
- Ding, L., Zhao, K., Zhang, L., Liang, P., Wu, S., Wong, M. H., & Tao, H. (2018a). Distribution and speciation of mercury affected by humic acid in mariculture sites at the Pearl River estuary [Distribución y especiación del mercurio bajo la influencia del ácido húmico en zonas de maricultura del estuario del río Pearl]. *Environmental Pollution*, *240*, 623-629. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.142>
- Durán, A. (1960). Cianuración. *DYNA*, *27*(76), 43. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/111506>

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

Evangelou, V. P., & Zhang, Y. L. (1995). A review: Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention [Una revisión: Mecanismos de oxidación de pirita y prevención del drenaje ácido de minas]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25(2), 141–199. <https://doi.org/10.1080/10643389509388477>

GARD Guide. (2024, 11 diciembre). *GARD Guide - Global Acid Rock Drainage Guide [Guía GARD - Guía mundial sobre el drenaje ácido de rocas]*. <https://gardguide.com/?title=Summary%3A>

Lehmann, M. N., O'leary, S., & Dunn, J. G. (2000). An evaluation of pretreatments to increase gold recovery from a refractory ore containing arsenopyrite and pyrrhotite [Una evaluación de pre-tratamientos para aumentar la recuperación de oro de un mineral refractario que contiene arsenopirita y pirrotina]. *Minerals Engineering*, 13(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00145-4)

Ley 1658 de 2013. Art 3. Por el cual se busca reducir y eliminar de manera segura y sostenible el uso del mercurio en las diversas actividades industriales del país. Julio de 2013.

Liu, H., Chen, B., Lan, Y., & Cheng, Y. (2003). SEM and AFM images of pyrite surfaces after bioleaching by the indigenous *Thiobacillus thiooxidans* [Imágenes de SEM y AFM de superficies de pirita tras la biolixiviación realizada por la cepa autóctona de *Thiobacillus thiooxidans*]. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 62(4), 414-420. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1280-0>

Loffredo, E., & Senesi, N. (2007). The Role of Natural Organic Matter (Humic Substances) on Adsorption of Pesticides Possessing Endocrine Disruptor Activity [El papel de la materia

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

orgánica natural (sustancias húmicas) en la adsorción de plaguicidas con actividad disruptora endocrina]. En *NATO science for peace and security series. C, Environmental security* (pp. 369-383). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6642-9_27

Loubser, M., & Verryyn, S. (2008). Combining XRF and XRD analyses and sample preparation to solve mineralogical problems [Combinación de análisis XRF y XRD y preparación de muestras para resolver problemas mineralógicos]. *South African Journal Of Geology*, 111(2-3), 229-238. <https://doi.org/10.2113/gssajg.111.2-3.229>

Mahoney, C., März, C., Buckman, J., Wagner, T., & Blanco-Velandia, V. (2019). Pyrite oxidation in shales: Implications for palaeo-redox proxies based on geochemical and SEM-EDX evidence [Oxidación de la pirita en las lutitas: implicaciones para los indicadores paleo-redox basados en datos geoquímicos y de SEM-EDX]. *Sedimentary Geology*, 389, 186-199. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.06.006>

Muñoz-Vallejo, L. F., García-Ardila, L. F., & De los Ángeles Rodríguez-Gázquez, M. (2012). Percepción sobre daños a la salud y utilidad de medidas de protección de personas expuestas ocupacionalmente al mercurio en la minería del oro. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(1), 53-61. <https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/rldi/article/view/289>

Neilson, J. W., Califf, K., Cardona, C., Copeland, A., Van Treuren, W., Josephson, K. L., Knight, R., Gilbert, J. A., Quade, J., Caporaso, J. G., & Maier, R. M. (2017). Significant Impacts of Increasing Aridity on the Arid Soil Microbiome [Impactos significativos del aumento de

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- la aridez en el microbioma de los suelos áridos]. *mSystems*, 2(3).
<https://doi.org/10.1128/msystems.00195-16>
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update [Hidrogeoquímica y microbiología del drenaje minero: una actualización]. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Organik SA. (2022). Black Diamond Líquido [Ficha técnica].
<https://stcroperproduction.blob.core.windows.net/uploads-public/docs/35hh13xr-hmdyq74zom-r/original.pdf>
- Ortiz, A. A., Jara, P. A. N., Rojas, V. S. A., Delgado, E. F. L., Lavado, L. J. Q., Sandoval, M. C., Santibañez, L. P., Díaz, C., Cerrón, J. A. y Guizado, J. N. A. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 12 (24), 49-55.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8135748>
- Paniagua, J. V. (2006). Estudio ambiental y optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro. *Ciencia & Desarrollo*, (10), 75-80.
<https://doi.org/10.33326/26176033.2006.10.204>
- Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B. (2016). Principles of sulfide oxidation and acid rock drainage [Principios de la oxidación de sulfuros y el drenaje ácido de rocas]. *Environmental Indicators in Metal Mining: Vol. XV* (1.^a ed., pp. 15-34). Bernd Lottermoser.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_2

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- Pérez Honores, C. (2003). Beneficio económico de minerales auríferos. *INGEMMET. Boletín, Serie G: Metalurgia; 6*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/367>
- Plymag. (s.f.). SM6 Extracto natural de *Ascophyllum Nodosum* [Ficha técnica]. <https://plymag.com/sm6-3/>
- Quintero, E., y Diaz, D. (2020). Identificación de alternativas de almacenamiento de relaves generados en la minería aurífera en Colombia (Tesis de especialización). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18115>
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reúso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 75-82. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81619984010>
- Sánchez-Andrea, I., Sanz, J. L., Bijmans, M. F., & Stams, A. J. (2014). Sulfate reduction at low pH to remediate acid mine drainage [Reducción de sulfatos en pH bajos, para remediar el drenaje ácido de la mina]. *Journal of hazardous materials*, 269, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.032>
- Sepulveda, J. A. M., y Casallas, M. R. (2023). Contaminación y remediación de suelos en Colombia. Aplicación a la minería de oro. Universidad EAN.
- Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-Based Biostimulants: Sustainable Applications in Agriculture for the Stimulation of Plant Growth, Stress Tolerance, and Disease Management [Bioestimulantes a base de *Ascophyllum nodosum*: aplicaciones sostenibles en la

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

agricultura para estimular el crecimiento vegetal, la tolerancia al estrés y el control de enfermedades]. *Frontiers In Plant Science*, 10, 655.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>

Technical Report Acid Mine Drainage Prediction. (1994). *National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)* (N.º 530R94036). Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/amd.pdf>

United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. (2014). Keys to Soil Taxonomy [Claves para la taxonomía del suelo]. (12.^a ed.). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>

Vargas, C., Pérez-Esteban, J., Escolástico, C., Masaguer, A., & Moliner, A. (2016). Phytoremediation of Cu and Zn by vetiver grass in mine soils amended with humic acids [Fitorremediación del cobre y el zinc mediante la hierba vetiver en suelos mineros enriquecidos con ácidos húmicos]. *Environmental Science And Pollution Research*, 23(13), 13521-13530. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6430-x>

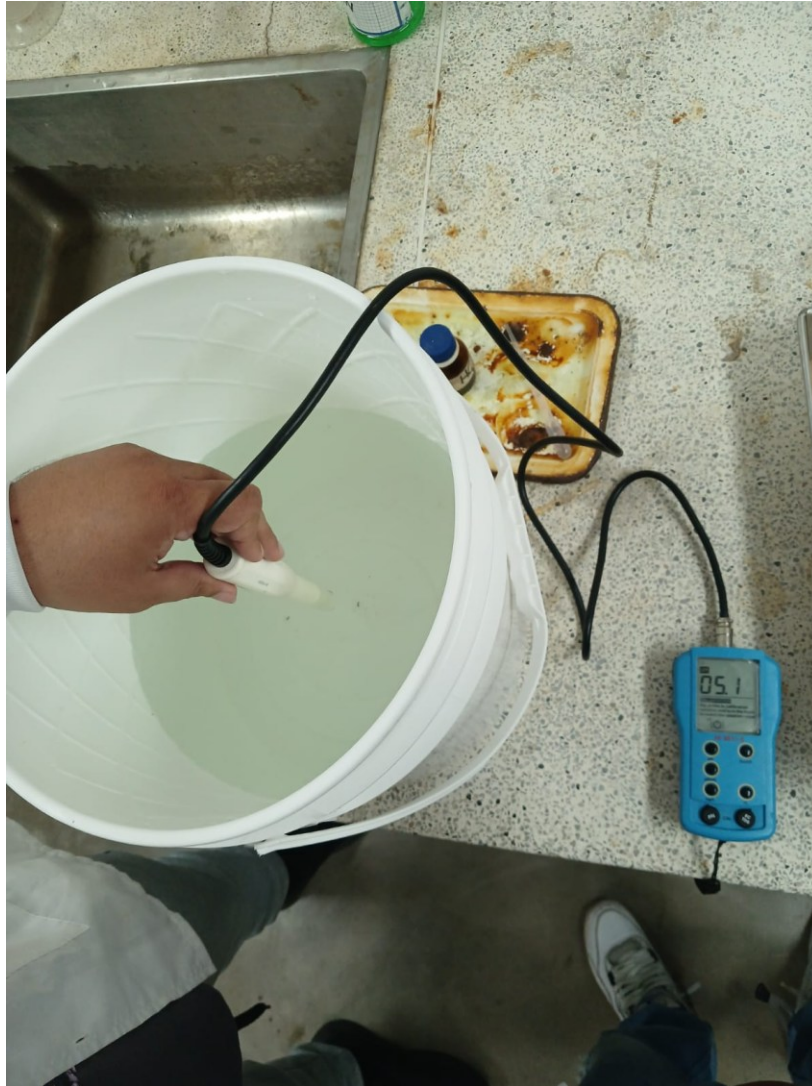
Vásquez Ochoa, O. Y. (2016). Evaluación de un biorreactor pasivo durante la remediación de drenajes ácidos de mina del distrito minero de Zipaquirá (Colombia). (Tesis doctoral). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia. <http://hdl.handle.net/10554/19645>.

Yabur, R., Bashan, Y., & Hernández-Carmona, G. (2007). Alginate from the macroalgae *Sargassum sinicola* as a novel source for microbial immobilization material in wastewater

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)

- treatment and plant growth promotion [El alginato de la macroalga *Sargassum sinicola* como nueva fuente de material para la inmovilización microbiana en el tratamiento de aguas residuales y la promoción del crecimiento vegetal]. *Journal Of Applied Phycology*, 19(1), 43-53. <https://doi.org/10.1007/s10811-006-9109-8>
- Yang, H., Luo, W., & Gao, Y. (2018). Effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on Humic-Acid Passivation Layer on Pyrite Surface [Efecto de *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre la capa de pasivación de ácido húmico en la superficie de la pirita]. *Minerals*, 8(10), 422. <https://doi.org/10.3390/min8100422>
- Zheng, K., Li, H., Xu, L., Li, S., Wang, L., Wen, X., & Liu, Q. (2019). The influence of humic acids on the weathering of pyrite: Electrochemical mechanism and environmental implications [La influencia de los ácidos húmicos en la meteorización de la pirita: mecanismo electroquímico y repercusiones medioambientales]. *Environmental Pollution*, 251, 738-745. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.060>
- Zingaretti, D., Lombardi, F., & Baciocchi, R. (2017). Soluble organic substances extracted from compost as amendments for Fenton-like oxidation of contaminated sites [Sustancias orgánicas solubles extraídas del compost como enmiendas para la oxidación de tipo Fenton en emplazamientos contaminados]. *The Science Of The Total Environment*, 619-620, 1366-1374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.178>

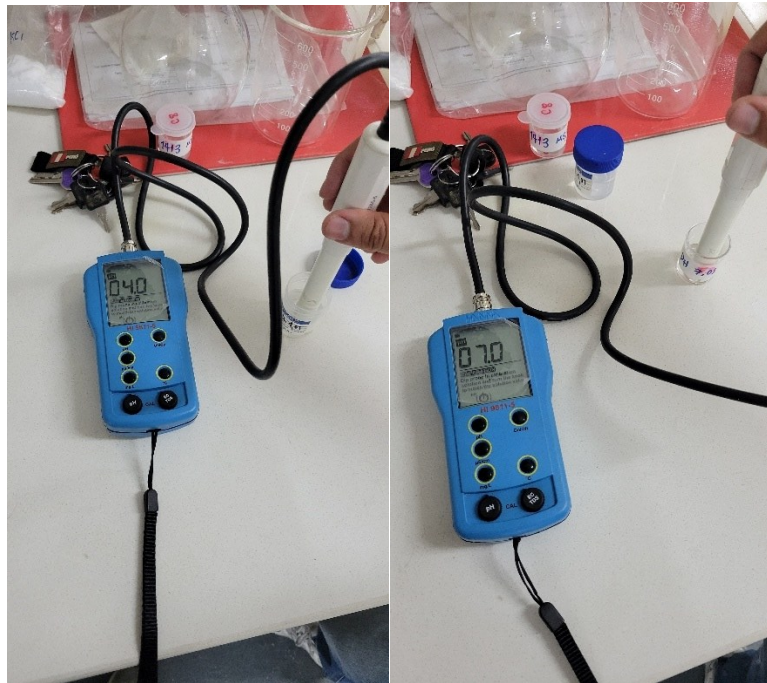
Apéndices



Apéndice A

Lectura del pH en la solución de peróxido de hidrogeno y agua

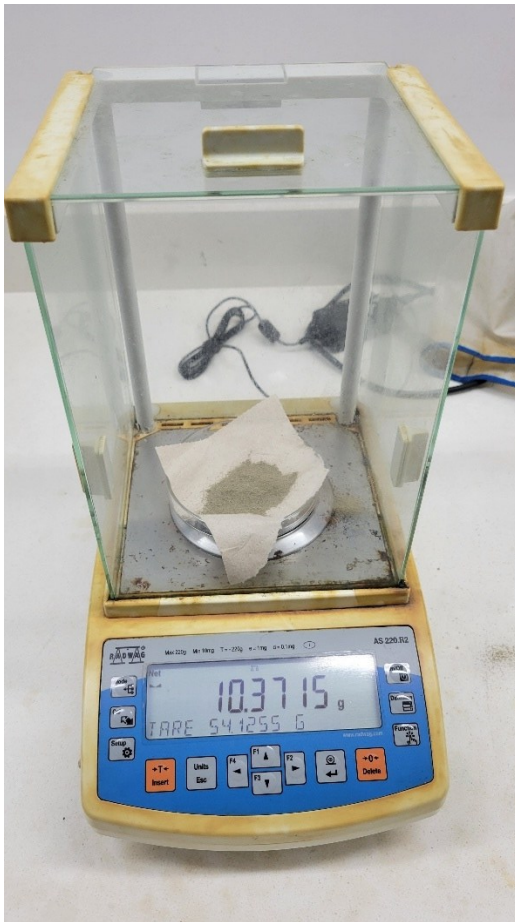
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



Apéndice C

Calibración del equipo de medición portátil de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine HI981

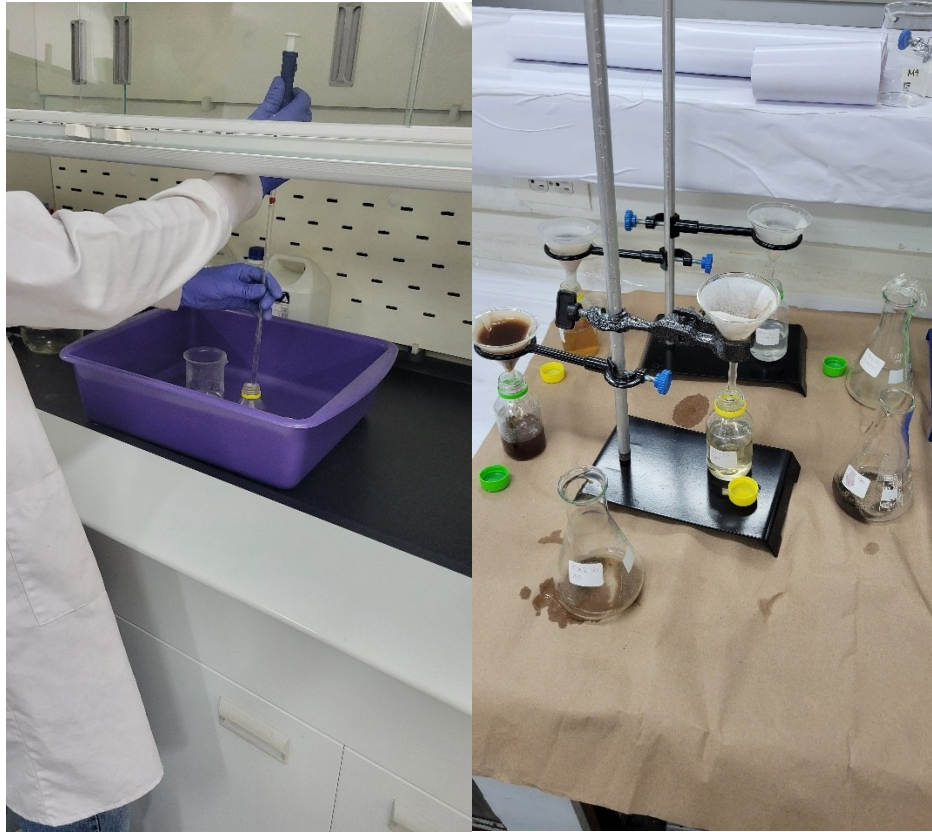
PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



Apéndice D

Masa medida del relave post experimental y posterior uso del agitador al mezclarlo con agua destilada para llevarlo al análisis de la facilidad de solubilidad del hierro en el material

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



Apéndice E

Uso del ácido HCl para la digestión de las muestras de hierro y posterior filtrado

PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)



Apéndice F

Uso del horno para el secado de las muestras solidas



Apéndice G

Cubos de pirita testigo de cada columna de lixiviación post experimental