



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



MINERALOGÍA Y PREDICCIÓN DE DRENAJE ÁCIDO MINERO (AMD) EN PASIVOS MINEROS AMBIENTALES

Habilitación Profesional para optar al Título de Geólogo

Rayén Fernanda Álvarez Garrido

Profesor Guía : Dra. Javiera Paz Gerding González

Profesor Comisión: Dr. Jonnathan Eduardo Álvarez Fuentes

Profesor Comisión: MSc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2025

A mis padres

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 TRABAJOS ANTERIORES	3
1.5 AGRADECIMIENTOS	4
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 PASIVOS MINEROS AMBIENTALES	6
2.1.1 Depósitos de relaves mineros	6
2.2 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (AMD)	7
2.2.1 Generación de acidez a partir de la oxidación de la pirita	8
2.2.2 Neutralización de la acidez	12
2.3 MÉTODOS ACTUALES DE PREDICCIÓN DE AMD	13
2.3.1 Enfoque metodológico y aplicación actual de los métodos de predicción de drenaje ácido	13
2.3.1.1 pH y CE en pasta	14
2.3.1.2 Prueba ABA modificado	14
2.3.1.3 Prueba NP-Sobek	15
2.3.1.4 Prueba ABCC	15
2.3.1.5 Prueba SPLP	15
2.3.2 Consideraciones sobre su aplicación práctica	16
2.3.3 Limitaciones en la aplicación práctica de los métodos actuales	16
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES	18
3.1 ENFOQUE GENERAL DEL ESTUDIO	18
3.2 ETAPA I: ANÁLISIS MINERALÓGICO	18
3.2.1 Preparación de muestras: briquetas y cortes transparentes	18
3.2.2 Microscopía óptica (transmitida y reflejada)	20
3.2.3 Procesamiento de imágenes	21
3.2.4 Difracción de rayos X (DRX)	22
3.2.5 QEMSCAN	22
3.2.6 ICP-OES	23
3.2.7 FAAS	24
3.3 ETAPA II: ENSAYOS QUÍMICOS TRADICIONALES	24
3.3.1 pH y CE en pasta	25
3.3.2 Prueba ABA modificado	25
3.3.3 Prueba NP-Sobek	26
3.3.4 Prueba ABCC	26
3.3.5 Prueba SPLP	27
3.4 ETAPA III: ANÁLISIS COMPLEMENTARIO POST-ENSAYOS QUÍMICOS	27
3.4.1 Selección de muestras tratadas	27

3.4.2 Evaluación comparativa pre y post tratamiento	28
3.5 ETAPA IV: INTEGRACIÓN DE RESULTADOS PARA LA PREDICCIÓN DE AMD	28
4. RESULTADOS	30
4.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA	30
4.1.1 Microscopía óptica	30
4.1.1.1 Muestras del relave Talcuna	30
4.1.1.2 Muestras del relave Goethita	31
4.1.1.3 Muestras del relave Jarosita	31
4.1.1.4 Muestras del relave Escondida	32
4.1.1.5 Muestras del relave DMH	32
4.1.2 Difracción de rayos X (DRX)	34
4.1.3 Resultados QEMSCAN	36
4.1.3.1 Muestras del relave Talcuna	36
4.1.3.2 Muestras del relave Goethita	38
4.1.3.3 Muestras del relave Jarosita	40
4.1.3.4 Muestras del relave Escondida	42
4.1.3.5 Muestras del relave DMH	44
4.1.4 Resultados de composición elemental en muestras originales (ICP- OES y FAAS)	46
4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	47
4.2.1 Resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta	47
4.2.2 Resultados de prueba ABA modificado	48
4.2.3 Resultados de prueba NP-Sobek	48
4.2.4 Resultados de prueba ABCC	49
4.2.5 Resultados de prueba SPLP	51
5. DISCUSIÓN	53
5.1 INTEGRACIÓN EFECTIVA DE TÉCNICAS MINERALÓGICAS Y QUÍMICAS	53
5.2 EVALUACIÓN CRÍTICA DE TÉCNICAS APLICADAS	54
5.2.1 Técnicas de caracterización mineralógica	54
5.2.2 Técnicas de caracterización química	55
5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO Y APLICABILIDAD DE TÉCNICAS	57
5.3.1 Microscopía óptica	58
5.3.2 Difracción de rayos X (DRX)	58
5.3.3 QEMSCAN	59
5.3.4 pH y CE en pasta	59
5.3.5 Prueba ABA modificado	59
5.3.6 Prueba NP-Sobek	60
5.3.7 Prueba ABCC	60
5.3.8 Composición química total y prueba SPLP	60
5.4 PROTOCOLO DE PREDICCIÓN PROPUESTO	60
6. CONCLUSIONES	63
7. REFERENCIAS	64
ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.	1. Etapas en la generación de acidez por la oxidación de pirita y evolución del pH	8
3.	2. Vista superior de muestras	19
3.	3. Microscopio óptico para petrografía NIKON OPTIPHOT 2-POL	21
3.	4. Cámara digital NIKON modelo DS-Fi3 acoplada al microscopio	21
3.	5. Equipo de difracción de rayos X	22
3.	6. Sistema QEMSCAN®	23
4.	7. Microfotografías de muestras del relave Talcuna	30
4.	8. Microfotografías de muestras del relave Goethita	31
4.	9. Microfotografías de muestras del relave Jarosita	32
4.	10. Microfotografías de muestras del relave Escondida	33
4.	11. Microfotografías de muestras del relave DMH	33
4.	12. Distribución semicuantitativa de grupos mineralógicos identificados por DRX	35
4.	13. Variación de asociaciones minerales de la calcita entre tratamientos del relave Talcuna	37
4.	14. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Talcuna	37
4.	15. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Goethita	39
4.	16. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Goethita	39
4.	17. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Jarosita	41
4.	18. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Jarosita	41
4.	19. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Escondida	43
4.	20. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Escondida	43
4.	21. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave DMH	45
4.	22. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave DMH	45
4.	23. Curvas de amortiguación de la prueba ABCC	50
5.	24. Esquema de integración de técnicas mineralógicas y químicas para el diagnóstico del potencial AMD	53
5.	25. Disolución de magnetita y su posible efecto en la prueba ABA modificado ..	56
5.	26. Protocolo integrado propuesto para la predicción del drenaje ácido minero (AMD)	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.	1. Reacciones de oxidación de los minerales sulfurados más relevantes y protones liberados	11
4.	2. Distribución semicuantitativa de grupos mineralógicos por muestra según análisis DRX	34
4.	3. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Talcuna (% en masa)	36
4.	4. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Goethita (% en masa)	38
4.	5. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Jarosita (% en masa)	40
4.	6. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Escondida (% en masa)	42
4.	7. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave DMH (% en masa)	44
4.	8. Cuantificación de elementos totales en muestras originales mediante ICP-OES	46
4.	9. Cuantificación de elementos totales en muestras originales mediante FAAS	46
4.	10. Resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta promedio de las muestras	47
4.	11. Resultados finales de la prueba ABA modificado.....	48
4.	12. Potencial de Neutralización (NP) promedio de cada relave obtenido en la prueba NP-Sobek	49
4.	13. Resultados de la prueba ABCC	50
4.	14. Resultados de la prueba SPLP	51
5.	15. Comparación de técnicas de caracterización mineralógica	55
5.	16. Resumen de parámetros químicos aplicados a las muestras de relave analizadas	57
5.	17. Nivel de recomendación de técnicas analíticas aplicadas según tipo de relave	58

RESUMEN

La actividad minera, fundamental para el desarrollo económico de Chile, genera una considerable cantidad de residuos sólidos, entre los que destacan los depósitos de relaves. Estos constituyen pasivos ambientales de alto riesgo debido a la posible generación de drenaje ácido de mina (AMD, por sus siglas en inglés *Acid Mine Drainage*), fenómeno que ocurre cuando los sulfuros metálicos presentes en los residuos se oxidan en presencia de agua y oxígeno, liberando ácido y metales al medio ambiente. En este contexto, la predicción temprana del AMD resulta crucial para una gestión ambiental responsable y preventiva, especialmente en depósitos antiguos o abandonados que cuentan con información limitada.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un protocolo de predicción del AMD, basado en la integración de técnicas químicas tradicionales y herramientas mineralógicas avanzadas. Para ello, se analizaron cinco muestras de relaves: Talcuna, Goethita, Jarosita, Escondida y DMH. Se aplicaron ensayos químicos estáticos como determinación de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta, ABA modificado, NP-Sobek, ABCC y SPLP, con el fin de evaluar el potencial acidificante y la capacidad neutralizante de cada muestra. Paralelamente, se realizó una caracterización mineralógica mediante microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX), y análisis mineral automatizado con QEMSCAN®, lo que permitió identificar y cuantificar los minerales presentes, así como evaluar su modo de ocurrencia, grado de liberación y asociaciones mineralógicas.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en la composición química y mineralógica entre las muestras, lo que influye directamente en su capacidad de generar o neutralizar acidez. La integración de ambas líneas de análisis permitió clasificar los relaves según su riesgo potencial de generación de AMD y evidenció las ventajas y limitaciones de cada técnica. Finalmente, se propone un protocolo metodológico secuencial que prioriza el uso complementario de herramientas mineralógicas y químicas como apoyo a la toma de decisiones en la gestión ambiental de pasivos mineros.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En Chile, el crecimiento económico de las últimas décadas ha estado estrechamente ligado a la explotación de sus recursos naturales, destacando la minería del cobre como una de las actividades más relevantes dentro del sector productivo. En el escenario global, el país se posiciona como el principal productor de cobre, concentrando aproximadamente el 30 % de las reservas mundiales de este recurso (Kubota, 2024; Comisión Chilena del Cobre [Cochilco], 2024a). Según datos reportados por Cochilco (2024b), la producción nacional alcanzó los 5,3 millones de toneladas métricas en 2022, 5,2 millones en 2023 y 5,5 millones en 2024, lo que refleja la continuidad de una alta demanda y explotación del recurso a nivel nacional.

La minería del cobre constituye una actividad industrial de gran envergadura, con una amplia distribución territorial que abarca principalmente las regiones del norte y centro del país (Calderón, 2001). Si bien esta industria representa un aporte económico considerable, también genera una cantidad significativa de residuos como consecuencia directa de sus procesos extractivos. Se estima que, actualmente, la actividad minera en Chile produce alrededor de 800 millones de toneladas métricas de desechos por año (Cacciuttolo & Atencio, 2022 en Godfrid *et al.*, 2024).

El elevado volumen de residuos ha contribuido a la conformación de un importante legado de pasivos ambientales mineros, entre los cuales se encuentran tranques de relaves, minas abandonadas y pilas de desmontes. Estos pasivos, junto con los residuos generados por operaciones en actividad, representan un desafío persistente en materia de gestión ambiental. De acuerdo con el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2023), hasta marzo de 2023 se han catastrado 764 depósitos a nivel nacional.

Uno de los problemas ambientales más relevantes asociados a estos residuos es la generación de drenaje ácido de mina (AMD), un proceso geoquímico que ocurre cuando minerales sulfurados, como la pirita, se oxidan al contacto con el oxígeno y el agua, generando soluciones ácidas capaces de movilizar metales potencialmente tóxicos. Aunque existen metodologías que permiten predecir este fenómeno, su aplicación se ha centrado predominantemente en ensayos químicos tradicionales,

sin considerar de manera sistemática la caracterización mineralógica. Esta omisión limita la comprensión integral del comportamiento acidificante de los materiales. En este sentido, se hace necesario avanzar hacia el desarrollo de protocolos más integradores, que contemplen tanto la composición química como mineralógica de los residuos mineros, con el fin de mejorar la precisión en la predicción del AMD y sus posibles impactos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque en la actualidad existen diversos métodos para predecir la generación de AMD, la mayoría de ellos se basa principalmente en ensayos químicos tradicionales. Entre los más utilizados se encuentran la prueba ABA modificado y la prueba NAG, valorados por su rapidez, simplicidad y bajo costo. Paralelamente, se han incorporado técnicas instrumentales como la difracción de rayos X (DRX), el análisis automatizado QEMSCAN y la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), entre otras, las cuales permiten obtener una caracterización detallada de la composición química y mineralógica de los residuos mineros (SERNAGEOMIN, 2015).

Sin embargo, estas herramientas no suelen aplicarse de manera integrada dentro de un protocolo metodológico unificado, lo que limita su efectividad para predecir con precisión el comportamiento real de los materiales en condiciones ambientales. En particular, la caracterización mineralógica y textural no se incorpora sistemáticamente, lo que restringe la capacidad de los métodos actuales para representar adecuadamente la reactividad de los residuos, especialmente en aquellos con asociaciones minerales complejas o con sulfuros de baja reactividad. Esta falta de integración compromete la fiabilidad de los resultados obtenidos y dificulta tanto la gestión ambiental de los residuos como la evaluación efectiva del riesgo que estos representan (Martínez, 2018).

La ausencia de un enfoque metodológico integral cobra relevancia en contextos donde se requiere anticipar con precisión la generación de AMD, ya sea en el diseño de medidas de prevención, planes de cierre o remediación de pasivos ambientales. La falta de predicciones confiables puede retrasar la implementación de estrategias de control y aumentar el riesgo de impactos sobre ecosistemas y comunidades aledañas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un protocolo que combine técnicas mineralógicas avanzadas y ensayos químicos tradicionales para mejorar la predicción del drenaje ácido de mina (AMD) en mineras activas y pasivos mineros en Chile.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar mineralógica y texturalmente muestras de activos y pasivos mineros usando difracción de rayos X, QEMSCAN, petrografía y calcografía de briquetas para identificar minerales clave en la generación de AMD.
- Evaluar las limitaciones de los ensayos químicos tradicionales (ABA modificado, NP-Sobek, ABCC y SPLP) en la predicción del AMD, identificando brechas en la consideración de la mineralogía.
- Integrar análisis mineralógicos y químicos para desarrollar un análisis predictivo más preciso y eficiente del AMD.

1.4 TRABAJOS ANTERIORES

En los últimos años, diversos estudios han buscado mejorar la predicción del AMD mediante la aplicación tanto de métodos químicos tradicionales como de técnicas mineralógicas avanzadas. A continuación, se presentan algunos de los trabajos más relevantes en este ámbito.

Martínez (2018) propone un protocolo de caracterización orientado a clasificar muestras de distintos relaves mineros, integrando metodologías clásicas de predicción de AMD con ensayos químicos estandarizados y estudios mineralógicos, texturales y geoquímicos. Si bien el enfoque ofrece una visión integral, su aplicación se restringe exclusivamente a relaves y no contempla un protocolo operativo que pueda ser replicado en otros tipos de residuos mineros.

Por su parte, Vega (2021) evaluó metodologías para escalar resultados de pruebas cinéticas de laboratorio, específicamente celdas de humedad, aplicadas a un depósito de estériles. El objetivo fue extrapolar los datos obtenidos en laboratorio a condiciones de terreno mediante factores de escala, con el fin de mejorar la precisión en la predicción del AMD. Aunque este enfoque mejora la

representatividad de los resultados en campo, no incorpora análisis mineralógicos, lo que limita su capacidad para evaluar de forma integral el comportamiento acidificante de los materiales.

En un enfoque más textural, Parbhakar-Fox *et al.* (2011) presenta un enfoque metodológico por etapas denominado GMT (geoquímica-mineralogía-textura), que incorpora un nuevo esquema de evaluación textural denominado Índice de Drenaje Ácido de Roca (ARDI, por sus siglas en inglés). Este índice fue desarrollado para caracterizar el potencial de generación de drenaje ácido de roca (ARD). Si bien el ARDI mejora la clasificación de residuos en comparación con los métodos químicos tradicionales, presenta limitaciones en la evaluación de la capacidad de neutralización.

En conjunto, estos estudios y otros han contribuido al avance y comprensión del AMD. No obstante, la falta de integración metodológica entre análisis químicos y mineralógicos evidencia la necesidad de desarrollar un protocolo unificado que permita una evaluación más precisa y representativa del potencial acidificante de los residuos mineros. Esta brecha metodológica es la que se aborda en el presente trabajo.

1.5 AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar agradeciendo al proyecto FONDECYT de Iniciación N° 11241237, financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y dirigido por la Dra. Javiera Gerding, cuyo respaldo fue fundamental para la ejecución de este estudio.

Agradezco profundamente a mi profesora guía, Dra. Javiera Gerding, por su constante apoyo, orientación y disposición a lo largo de todo este proceso. Su acompañamiento fue clave para concretar esta etapa. Asimismo, extiendo mi agradecimiento al profesor Jonnathan Álvarez y al profesor Germán Velásquez, por su permanente disposición a resolver dudas y aportar con una mirada crítica y constructiva.

A los profesores y funcionarios del Departamento de Ciencias de la Tierra, gracias por su amabilidad constante y por estar siempre dispuestos a colaborar, haciendo que el camino académico fuera más llevadero y acogedor. Del mismo modo, agradezco al equipo del Instituto GEA por su apoyo permanente y por facilitar cada una de las instancias necesarias para llevar a cabo mi investigación.

A mi familia, comenzando con mis padres, Jessica y Gastón: gracias por estar ahí siempre, por el amor incondicional, el apoyo en todas sus formas y por enseñarme a nunca rendirme. Todo lo que soy y he logrado se debe en gran parte a ustedes. Gracias por acompañarme en cada paso, por confiar en mí y por darme siempre lo mejor.

A mis hermanas, Javi y Morita. Gracias, Javi, por cuidar de mí siempre, por velar porque nada me faltara y por tu constante preocupación. Y a Morita, por acompañarme desde siempre y seguir haciéndolo incluso en su ausencia física; sé que, de alguna manera, siempre estará conmigo. A mi prima Cami, gracias por las risas, por escucharme cada vez que lo necesité y por hacerme sentir acompañada sin importar el momento.

También quiero agradecer a Gian, por ser un gran amigo durante todos estos años (que fueron varios). Gracias por escucharme (mucho), aconsejarme (muchísimo), animarme y estar presente incluso en los días más difíciles. A mi querida Valentina, que, aunque llegó un poco más tarde, se volvió muy importante. Gracias por estar ahí, por tu apoyo constante y por hacer que estos últimos años hayan sido más livianos y felices. Y por supuesto, gracias a Catalina y Eliseo, por incluirme siempre y por hacer más bonito este camino universitario.

Y, por último, me agradezco a mí. Porque no siempre fue fácil, pero aun así seguí. Por haber crecido, cambiado y aprendido tanto en estos años. Por no haberme rendido, incluso cuando todo parecía cuesta arriba. Porque si llegué hasta aquí, fue también gracias a mí.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PASIVOS MINEROS AMBIENTALES

La minería es una actividad productiva de duración limitada, ya que los recursos minerales explotados son finitos. A lo largo de su desarrollo, esta industria genera impactos significativos en el medio ambiente, provocando alteraciones físicas, químicas y biológicas en los ecosistemas (Arango & Olaya, 2012). En este contexto, el concepto de pasivo ambiental minero (PAM) hace referencia a toda infraestructura o instalación asociada a la actividad minera, así como a los depósitos de residuos generados por esta, entre los que se incluyen relaves, rípios de lixiviación, botaderos de estéril y tortas salitreras. Asimismo, se consideran como parte de estos pasivos los efluentes líquidos y las emisiones atmosféricas producidas durante la operación de faenas mineras que, en la actualidad, se encuentran abandonadas, cerradas o inactivas, y que constituyen un riesgo permanente o potencial para la salud humana y los ecosistemas circundantes (Oblasser, 2016).

2.1.1 Depósitos de relaves mineros

Los depósitos de relaves mineros constituyen una de las formas más comunes de pasivos ambientales mineros (PAM), ya que en ellos se acumulan los residuos generados durante las etapas de procesamiento de minerales. Los relaves, también conocidos como colas, corresponden al material descartado tras la recuperación de minerales de interés económico, y se originan principalmente a partir del material fino extraído in situ desde el yacimiento (SERNAGEOMIN, 2007).

Estos residuos se generan, en su mayoría, durante los procesos de concentración mineral, siendo la flotación por espuma una de las técnicas más empleadas para este propósito. Este método permite la separación selectiva de los minerales valiosos contenidos en una matriz compuesta por materiales sin valor comercial (Horwood, 1909; Hoover, 1914; Gaudin, 1957; King, 2001; Wills y Napier-Munn, 2006 en Sandoval-Zambrano & Montes-Atenas, 2012). El subproducto resultante de esta operación es una suspensión acuosa de partículas sólidas finamente molidas, denominada pulpa de relaves, que ha pasado por una o más etapas de molienda fina y está compuesta principalmente por el material del yacimiento del cual ya se ha extraído la fracción económicamente explotable (SERNAGEOMIN, 2007).

Debido a su naturaleza fluida y al alto contenido de agua, los relaves deben ser almacenados en estructuras de confinamiento seguras, tales como tranques, embalses o balsas, ya sean de origen natural o construidas artificialmente. Estas estructuras suelen emplazarse en depresiones topográficas, como valles o cuencas ubicadas entre formaciones montañosas, las cuales son cerradas mediante muros de contención diseñados específicamente para retener el material. En estas condiciones, es común que volúmenes de relaves permanezcan expuestos durante períodos prolongados a procesos de meteorización, lo que puede provocar alteraciones químicas y físicas en el depósito, con implicancias ambientales significativas a largo plazo (Engels, 2006 en Martínez, 2018).

Esta exposición sostenida a agentes atmosféricos, junto con la presencia de minerales sulfurados, genera un entorno propicio para el desarrollo de procesos de oxidación que pueden derivar en la formación de drenaje ácido de mina (AMD), fenómeno que se detalla en el siguiente apartado.

2.2 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (AMD)

El drenaje ácido es un fenómeno que puede ser tanto natural como inducido por la actividad humana, y ocurre cuando minerales sulfurados, como la pirita (FeS_2), son expuestos a condiciones atmosféricas oxidantes. Este proceso se caracteriza por la acidificación del agua y la liberación de metales pesados potencialmente tóxicos. El drenaje ácido de rocas (DAR) corresponde a su expresión natural, originada por la oxidación de minerales sulfurosos en la corteza terrestre debido a procesos geológicos (Asta *et al.*, 2011), mientras que el drenaje ácido de mina (AMD) está estrechamente relacionado con las actividades humanas, particularmente con la explotación de yacimientos minerales.

El AMD se genera cuando los minerales sulfurados, que antes permanecían confinados en el subsuelo, son extraídos y expuestos a condiciones atmosféricas oxidantes. Esta exposición, comúnmente en minas a cielo abierto y en depósitos de residuos mineros (relaves), desencadena una serie de procesos de disolución oxidativa que resultan en la formación de aguas ácidas (Asta *et al.*, 2011).

La actividad minera, en particular, produce una gran cantidad de residuos, siendo los relaves mineros una de las principales formas de disposición de material residual. Estos relaves, generados a partir de procesos industriales como la molienda y la flotación, presentan una granulometría fina y homogénea, lo que incrementa significativamente su superficie específica expuesta. Esta característica hace que los relaves sean especialmente susceptibles a la meteorización y a la acción de agentes atmosféricos como el oxígeno y el agua. La exposición prolongada de estos materiales favorece la formación de drenajes ácidos de mina (AMD), especialmente cuando los minerales sulfurados, como la pirita, están presentes en la ganga que los constituye (Chaparro, 2015; Martínez, 2018).

2.2.1 Generación de acidez a partir de la oxidación de la pirita

La pirita es uno de los minerales más comunes en los relaves mineros, y es especialmente propensa a generar drenaje ácido. Su oxidación comienza a los pocos minutos de ser expuesta a la atmósfera (Chandra & Gerson, 2010). Según diversos autores, como Senese *et al.*, (2021), Martínez (2018) y otros, han establecido que la formación de aguas ácidas derivada de la oxidación de la pirita se desarrolla en tres fases principales (Figura 1), que se describen a continuación:

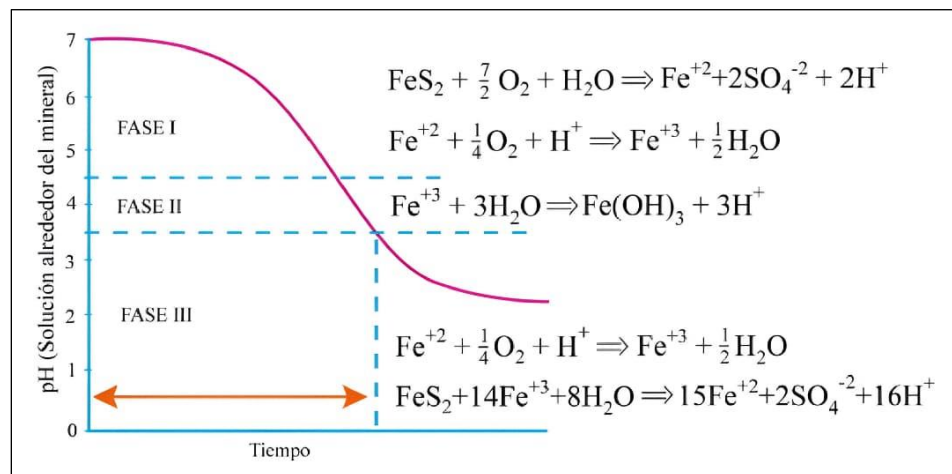
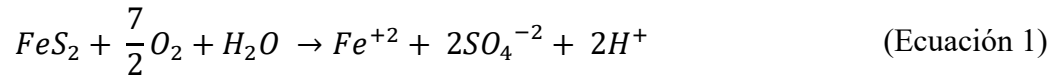


Figura 1. Etapas en la generación de acidez por la oxidación de pirita y evolución del pH. Tomado de Aubertin *et al.* (2001) en Vásquez (2016).

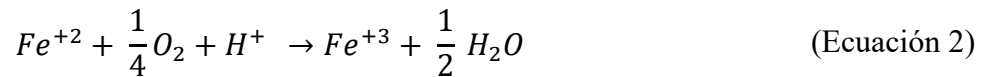
Fase I

El proceso inicial de generación de drenajes ácidos se desarrolla en condiciones de pH neutro, comenzando con la oxidación de minerales sulfurados, principalmente la pirita (FeS_2), cuando entra en contacto con el oxígeno atmosférico (Ecuación 1).



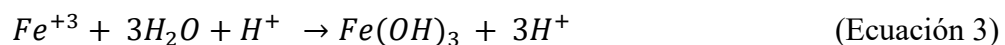
En esta fase, la pirita se oxida, liberando iones ferrosos (Fe^{2+}), sulfatos (SO_4^{2-}) y protones (H^+), lo que provoca la acidificación del medio. No obstante, en esta etapa inicial, la acidez generada es parcialmente neutralizada por minerales con capacidad de consumo de ácido presentes en el entorno, lo que permite que el pH se mantenga cercano a la neutralidad durante un periodo limitado (Martínez, 2018).

A medida que progresa la reacción y el potencial redox se mantiene elevado, con un pH igual o superior a 7, cercano a la neutralidad, el ión ferroso (Fe^{2+}) se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}), como se muestra en la Ecuación 2. Este proceso resulta en una mayor liberación de protones (H^+), lo que, a su vez, incrementa la acidez del sistema (Martínez, 2018). Durante esta fase, la velocidad de oxidación permanece moderada, y la formación de aguas ácidas ocurre tanto por mecanismos químicos como por la actividad biológica de bacterias acidófilas, como *Thiobacillus ferrooxidans*, que aceleran de manera significativa las reacciones de oxidación (Senese *et al.*, 2021).



Fase II

Cuando los minerales neutralizadores o consumidores de ácido dejan de actuar, el sistema pierde su capacidad de amortiguación, lo que provoca una disminución continua del pH, alcanzando valores entre 3 y 4.5. En esta etapa, la oxidación bacteriana de microorganismos como *Acidimicrobium ferrooxidans* y *Sulfobacillus acidophilus* se convierte en el proceso predominante, acelerando la conversión de Fe^{2+} a Fe^{3+} , como se muestra en la Ecuación 2. Este proceso favorece la formación de hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$), un compuesto insoluble que precipita, contribuyendo a la coloración amarilla-anaranjada observada en las aguas, como se describe en la Ecuación 3.

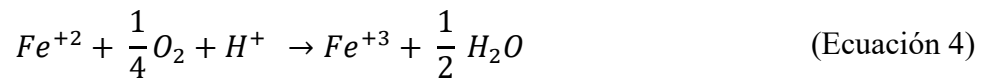


A medida que el pH sigue descendiendo, la oxidación bacteriana indirecta se vuelve más eficiente que la oxidación directa por oxígeno atmosférico, conocido como mecanismo directo (Martínez,

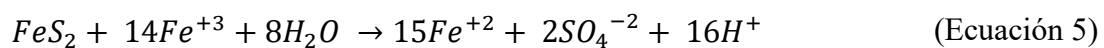
2018; Senese *et al.*, 2021; Waybrant *et al.*, 1998). El Fe^{3+} generado en la Ecuación 2 no se precipita por completo. La fracción de Fe^{3+} no precipitada se utiliza para oxidar más pirita, lo que incrementa aún más la acidez del sistema (Palma, 2018).

Fase III

En esta fase, el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} , liberando agua (H_2O) en el proceso (Ecuación 4). Cabe señalar que esta reacción ya fue presentada anteriormente como Ecuación 2, en el contexto de la Fase I. Sin embargo, se retoma aquí debido a su importancia en condiciones de pH más ácido, donde el Fe^{3+} comienza a desempeñar un rol predominante como agente oxidante frente a la pirita. En condiciones de pH elevado, los iones Fe^{2+} son más estables, pero cuando el pH desciende por debajo de 3, el Fe^{3+} se convierte en un agente oxidante mucho más potente, acelerando la oxidación de minerales sulfurados que previamente no reaccionaban. El aumento de la acidez en el sistema provoca que el Fe^{3+} se mantenga disuelto, lo que incrementa su capacidad de oxidación y reduce la precipitación de hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$). Este fenómeno intensifica la generación de ácido y acelera la oxidación de la pirita (Senese *et al.*, 2021; Nordstrom, 1982).



La oxidación de la pirita en presencia de Fe^{3+} ocurre a una velocidad considerablemente mayor que cuando se oxida con oxígeno (O_2). A medida que el pH disminuye, el Fe^{3+} se convierte en un agente oxidante más eficaz, incrementando su capacidad para oxidar la pirita de manera más eficiente. En este proceso, la reacción de 1 mol de pirita con Fe^{3+} genera 16 moles de H^+ (como se observa en la Ecuación 5), en comparación con los 2 moles de H^+ producidos por la oxidación con oxígeno (Ecuación 1). Aunque en sus primeras etapas la oxidación es relativamente lenta, la disminución progresiva del pH reduce la capacidad de neutralización del sistema, lo que favorece una mayor eficiencia del Fe^{3+} en la oxidación de la pirita, acelerando así la formación de drenajes ácidos de mina (AMD) (Palma, 2018).



No obstante, la pirita no es el único sulfuro que sufre oxidación y genera protones. Existen otros minerales sulfurados que también participan en estos procesos, como se muestra en la Tabla 1, donde se presentan diversas reacciones de oxidación de sulfuros y la cantidad correspondiente de protones liberados en cada caso. Cabe destacar que estas ecuaciones representan modelos idealizados y parciales, por lo que pueden diferir de las reacciones reales que ocurren en la naturaleza (Dold, 2017; Elghali *et al.*, 2023).

Tabla 1. Reacciones de oxidación de los minerales sulfurados más relevantes y protones liberados.
Modificado de Dold (2017).

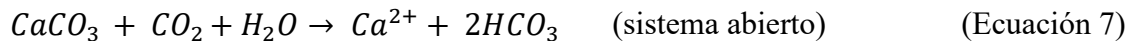
<i>Mineral de sulfuro</i>	<i>Reacción</i>	<i>Moles De H⁺</i>
<i>Oxidación vía Oxígeno + Hidrólisis de Fe³⁺</i>		
<i>Pirita (FeS₂)</i>	$\text{FeS}_2 + 3.75\text{O}_2 + 3.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	4
<i>Arsenopirita (FeAsS)</i>	$\text{FeAsS} + 2\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{SO}_4^{2-} + \text{HAsO}_4^{2-} + 3\text{H}^+$	3
<i>Calcopirita (CuFeS₂)</i>	$\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	2
<i>Pirrotita (Fe_{1-x}S)</i>	$\text{Fe}_{0.9}\text{S} + 2.157\text{O}_2 + 2.35\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.9\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	2
<i>Enargita (Cu₃AsS₄)</i>	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4 + 8.75\text{O}_2 + 2.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Cu}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + \text{HAsO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	4
<i>Galena (PbS)</i>	$\text{PbS} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	0
<i>Oxidación vía Hierro Férrico</i>		
<i>Pirita (FeS₂)</i>	$\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16/2^a \text{H}^+$	16/2 ^a
<i>Arsenopirita (FeAsS)</i>	$\text{FeAsS} + 13\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 14\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{HAsO}_4^{2-} + 15/2^a \text{H}^+$	15/2 ^a
<i>Calcopirita (CuFeS₂)</i>	$\text{CuFeS}_2 + 16\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 17\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16/0^a \text{H}^+$	16/0 ^a
<i>Pirrotita (Fe_{1-x}S)</i>	$\text{Fe}_{0.9}\text{S} + 7.8\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 8.7\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8/0^a \text{H}^+$	8/0.2 ^a
<i>Enargita (Cu₃AsS₄)</i>	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4 + 35\text{Fe}^{3+} + 20\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Cu}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + \text{HAsO}_4^{2-} + 39/4^a \text{H}^+$	39/4 ^a
<i>Galena (PbS)</i>	$\text{PbS} + 8\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 8\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8/0^a \text{H}^+$	8/0 ^a

^a **Nota:** Indica que una parte de los protones generados se consume durante la formación de Fe³⁺ a partir de Fe²⁺, disminuyendo la acidez neta liberada.

2.2.2 Neutralización de la acidez

Así como existe la generación de drenaje ácido a partir de la oxidación de sulfuros, también puede producirse su neutralización, un proceso que permite aumentar el pH y reducir la acidez del sistema. Esta neutralización ocurre principalmente por la disolución de minerales carbonatados (Jambor *et al.*, 2002), entre los cuales destacan la calcita (CaCO_3), la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y, en menor medida, la siderita (FeCO_3) (Elghali *et al.*, 2023; Asta *et al.*, 2011). La calcita es el mineral neutralizante más común y, junto con la dolomita, presenta un alto potencial de neutralización, lo que las convierte en minerales especialmente eficaces para contrarrestar la acidez (Bouzahzah *et al.*, 2015).

Durante este proceso, los protones (H^+) liberados por la oxidación de sulfuros reaccionan con los carbonatos presentes en el medio. Según Elghali *et al.* (2023), la disolución de la calcita puede representarse mediante distintas reacciones químicas, dependiendo del sistema y del pH (Ecuación 6-7-8).



De acuerdo con Dold, (2003), la reacción de disolución de la calcita permite que un mol de este mineral neutralice, en promedio, un mol de protones. Si se considera que la oxidación de un mol de pirita libera cuatro moles de H^+ , entonces serían necesarios cerca de cuatro moles de calcita para neutralizar completamente la acidez generada. Esta relación pone en evidencia que, en condiciones mineras, los minerales carbonatados pueden consumirse más rápidamente que los sulfuros acidificantes, lo que limita la capacidad de neutralización a largo plazo si no existe un suministro sostenido de material alcalino (Elghali *et al.*, 2023).

Por otra parte, no todos los minerales presentes en un sistema contribuyen de forma efectiva a la neutralización. Aunque los carbonatos son los más eficientes, algunos silicatos también pueden participar, aunque con menor capacidad (Dold, 2003; Jambor *et al.*, 2002). Sin embargo, es importante considerar que ciertos minerales como la siderita (FeCO_3), a pesar de ser un carbonato,

y algunos aluminosilicatos de hierro, como la biotita y la clorita, pueden eventualmente favorecer la formación de acidez. Esto ocurre debido a la presencia de hierro ferroso Fe^{2+} en su estructura, el cual puede oxidarse y generar protones, actuando de forma contraria al proceso de neutralización (Asta *et al.*, 2011; Bouzahzah *et al.*, 2015).

2.3 MÉTODOS ACTUALES DE PREDICCIÓN DE AMD

2.3.1 Enfoque metodológico y aplicación actual de los métodos de predicción de drenaje ácido

En el contexto chileno, SERNAGEOMIN (2015) propone un enfoque metodológico estructurado para abordar de manera integral la problemática del drenaje ácido de mina. Este comienza con una etapa de reconocimiento en terreno, que consiste en una inspección preliminar basada en la observación de indicadores *in situ*. Esta actividad, que debe ser realizada por profesionales calificados, representa una primera aproximación diagnóstica del potencial acidificante del material.

Posteriormente, se sugiere llevar a cabo una caracterización detallada que permita identificar las especies minerales y elementos presentes, lo que constituye la base para evaluar el potencial de generación o neutralización de acidez. Para ello, se emplean métodos petrográficos (como lupa binocular y microscopía óptica), técnicas instrumentales de análisis elemental (XRF, ICP-MS, ICP-OES, AAS, FAAS) y análisis mineralógicos avanzados (DRX, SEM, TEM, QEMSCAN, espectroscopía Mössbauer). También pueden utilizarse métodos específicos para la identificación de sulfuros, como la volatilización o la extracción química selectiva.

Una vez realizada esta caracterización, se aplican ensayos estandarizados de laboratorio para estimar el comportamiento acidificante del material. Según SERNAGEOMIN (2015), estos se clasifican en pruebas estáticas y pruebas cinéticas.

Las pruebas estáticas, de carácter cualitativo, se utilizan ampliamente debido a su baja complejidad operativa, su corta duración, que generalmente va desde algunas horas hasta pocos días, y su bajo costo (Chotpantararat, 2011). Estas permiten evaluar rápidamente la reactividad del material y algunas de sus propiedades químicas fundamentales (Vega, 2021), en particular su capacidad para generar o neutralizar acidez (White *et al.*, 1999 en Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015; Chotpantararat, 2011).

Entre las metodologías más utilizadas se encuentran el ensayo de contabilidad ácido-base (*Acid-Base Accounting*, ABA), el test de generación neta de acidez (*Net Acid Generation*, NAG), y otras pruebas complementarias como la medición de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta, los ensayos de lixiviación por precipitación sintética (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*, SPLP) y de características de toxicidad (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*, TCLP), así como la prueba de potencial de neutralización de Sobek (NP-Sobek) y la curva de capacidad de amortiguación ácida (*Acid Buffering Characteristic Curve*, ABCC). Estas metodologías han sido ampliamente descritas en la literatura técnica y académica (AMIRA, 2002; MEND, 1991, 2009; Sobek *et al.*, 1978; SERNAGEOMIN, 2015; Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015; Chotpantarat, 2011; EPA, 1992, 1994; SGS, 2023).

En el presente estudio se seleccionaron aquellos ensayos que, además de ser reconocidos por su eficacia, permiten una mejor integración con el análisis mineralógico. A continuación, se describen los métodos aplicados.

2.3.1.1 pH y CE en pasta

Estos ensayos constituyen pruebas básicas. El pH en pasta permite determinar la actividad de los iones hidrógeno presentes en la muestra (Sobek *et al.*, 1978), lo que se traduce en una estimación del grado de acidez o alcalinidad disponible. Valores de pH superiores a 7 suelen indicar la presencia de carbonatos, mientras que valores inferiores a 5 sugieren un potencial acidificante (MEND, 1991). Por su parte, la conductividad eléctrica permite estimar la salinidad del material, asociada principalmente a la presencia de sales solubles. Valores elevados de CE pueden reflejar la presencia de sulfatos u otros iones disueltos (SERNAGEOMIN, 2015), los cuales evidencian la ocurrencia de procesos de oxidación sulfídica.

2.3.1.2 Prueba ABA modificado

La prueba de Contabilidad Ácido-Base Modificada (*Modified Acid-Base Accounting*, ABA) permite clasificar si una muestra actúa como generadora o consumidora de acidez (MEND, 1991). Esta evaluación se basa en el cálculo del Potencial Neto de Neutralización (NNP, por sus siglas en inglés), obtenido como la diferencia entre el Potencial de Neutralización (NP, por sus siglas en inglés) y el Potencial de Acidez (AP, por sus siglas en inglés) (Villegas, 2025). Asimismo, se calcula la Relación

de Potencial de Neutralización ($NPR = NP / AP$), que permite clasificar las muestras según su comportamiento: materiales con $NPR < 1$ se consideran potencialmente generadores de ácido (PAG, por sus siglas en inglés), aquellos con $NPR > 2$ como no generadores de ácido (No-PAG, por sus siglas en inglés) y los que presentan valores intermedios ($1 < NPR \leq 2$) como inciertos (MEND, 2009).

2.3.1.3 Prueba NP-Sobek

El ensayo NP-Sobek, desarrollado por Sobek *et al.* (1978), estima el potencial de neutralización (NP) y el potencial generador de acidez (AP) en residuos mineros (MEND, 1991). Es la metodología original que dio origen a variantes posteriores, como la prueba ABA modificada, y se caracteriza por su rapidez, facilidad de aplicación y bajo costo (MEND, 1991). Su procedimiento se basa en una digestión ácida a temperaturas elevadas (80 °C), seguida de una etapa de ebullición que permite disolver completamente los minerales carbonatados presentes en la muestra (Villegas, 2025).

2.3.1.4 Prueba ABCC

La prueba ABCC (*Acid Buffering Characteristic Curve*) permite evaluar la capacidad de una muestra para neutralizar la acidez mediante una curva de amortiguación, determinando qué parte de su potencial de neutralización (PN) o capacidad de neutralización ácida (ANC) reacciona efectivamente ante la adición de ácido (AMIRA, 2002). Su finalidad es cuantificar el porcentaje de neutralización real (%RN) del material, lo que ayuda a clasificarlo como generador (PAG) o no generador de acidez (No-PAG) cuando posee carbonatos reactivos suficientes para contrarrestar la acidez generada por sulfuros (Villegas, 2025; MEND, 2009).

2.3.1.5 Prueba SPLP

La prueba SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*) es un ensayo diseñado para reproducir en laboratorio las condiciones ácido-lluviosas que podrían actuar sobre residuos mineros, como relaves. El objetivo es evaluar la liberación de metales y otros analitos inorgánicos solubles bajo esas condiciones (SERNAGEOMIN, 2015; Villegas, 2025).

Aunque las pruebas estáticas son útiles como diagnóstico inicial, sus resultados pueden ser limitados en muestras con comportamiento incierto. En tales casos, se recurre a pruebas cinéticas para obtener una evaluación más completa del potencial de generación de acidez.

Las pruebas cinéticas, de carácter cuantitativo, se aplican cuando los resultados de las pruebas estáticas son inconclusos o evidencian un claro potencial de generación de drenaje ácido (SERNAGEOMIN, 2015). Estas se utilizan principalmente en muestras clasificadas como potencialmente acidificantes, con el objetivo de medir el tiempo de inicio y la duración del proceso de acidificación (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). A diferencia de las pruebas estáticas, los ensayos cinéticos simulan condiciones ambientales reales, como las de botaderos mineros, lo que implica mayores volúmenes de muestra, periodos de ensayo prolongados y costos más elevados (SERNAGEOMIN, 2015; Vega, 2021). Entre los métodos más comunes se encuentran las celdas de humedad, los ensayos en columnas, el B.C. Research Confirmation Test y la extracción Soxhlet.

2.3.2 Consideraciones sobre su aplicación práctica

En estudios aplicados, la predicción de drenaje ácido suele apoyarse principalmente en pruebas estáticas, debido a su facilidad de implementación, rapidez, bajo costo y disponibilidad en laboratorios con recursos limitados (Charles *et al.*, 2015 en Matsumoto *et al.*, 2018). En contraste, las pruebas cinéticas, si bien ofrecen una mayor precisión al simular condiciones ambientales reales, requieren más tiempo y recursos, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas más breves y económicas para su aplicación rutinaria (Moyo *et al.*, 2025). De manera similar, el uso de técnicas mineralógicas avanzadas ha sido limitado, lo que ha dificultado su incorporación sistemática en los programas de predicción basados en métodos químicos convencionales. Esta limitada implementación ha generado vacíos importantes en la caracterización integral del potencial acidificante de los materiales, los cuales se abordan en el siguiente apartado.

2.3.3 Limitaciones en la aplicación práctica de los métodos actuales

A pesar de la existencia de guías técnicas, como las propuestas por SERNAGEOMIN (2015), en la práctica estas no se aplican de manera sistemática en los estudios de predicción de drenaje ácido de mina (AMD). En la mayoría de los casos, se recurre únicamente a ensayos químicos tradicionales, especialmente pruebas estáticas, debido a su bajo costo y facilidad de ejecución. Sin embargo, esto

implica dejar de lado enfoques más integrales, como la caracterización textural, que sigue ausente en gran parte de los programas de evaluación (Parbhakar-Fox *et al.*, 2011).

Este enfoque parcial ha sido ampliamente cuestionado en la literatura, ya que limita la capacidad predictiva de los métodos utilizados. Martínez (2018), por ejemplo, señala que los ensayos químicos tradicionales presentan limitaciones importantes, ya que no siempre reflejan con precisión el comportamiento real del sistema, especialmente cuando se trata de materiales con minerales de baja reactividad o con asociaciones mineralógicas complejas.

Actualmente, no existe un protocolo estandarizado que integre análisis químicos, mineralogía avanzada y evaluación textural, lo que constituye una brecha relevante en la predicción del comportamiento acidificante de materiales, especialmente en pasivos ambientales. Esto evidencia la necesidad de enfoques integrados que consideren la composición química, la mineralogía activa y la textura, como aspectos clave para una evaluación ambiental más precisa y representativa.

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

3.1 ENFOQUE GENERAL DEL ESTUDIO

La metodología de este estudio se organizó en cuatro etapas. En la primera, se llevó a cabo un análisis de cinco muestras de relaves mineros utilizando técnicas mineralógicas (microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX) y QEMSCAN) y de análisis elemental (ICP-OES y FAAS).

La segunda etapa consideró la incorporación de ensayos químicos tradicionales (pH y CE en pasta, ABA modificado, NP-Sobek, ABCC y SPLP), cuyos resultados fueron aportados por el químico analista Gonzalo Villegas, en el marco de su trabajo de título (Villegas, 2025).

En una tercera etapa, se realizó un análisis complementario sobre muestras seleccionadas para evaluar los cambios mineralógicos inducidos por los ensayos químicos, utilizando nuevamente microscopía óptica, DRX y QEMSCAN.

Finalmente, en la cuarta etapa, se integraron los resultados obtenidos con el fin de examinar la relación entre mineralogía y reactividad geoquímica, fortaleciendo así la predicción del drenaje ácido minero (AMD).

3.2 ETAPA I: ANÁLISIS MINERALÓGICO

Las preparaciones de muestras y los análisis instrumentales descritos en los siguientes apartados fueron realizados en el Laboratorio del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, utilizando equipamiento especializado correspondiente a cada técnica. Cabe señalar que, aunque ICP-OES y FAAS son técnicas de análisis químico-elemental, en este estudio se integran en esta etapa debido a su aplicación directa sobre extractos derivados de la prueba SPLP, así como por su utilidad complementaria para la interpretación mineralógica.

3.2.1 Preparación de muestras: briquetas y cortes transparentes

Para el desarrollo de los análisis, se utilizaron distintos tipos de preparación de muestras, según los requerimientos específicos de cada técnica aplicada.

En primer lugar, se prepararon cinco muestras originales pulverizadas a partir de material proveniente de cinco relaves distintos, destinadas al análisis mediante difracción de rayos X (DRX). La pulverización se realizó utilizando un molino planetario marca Fritsch, modelo Pulverisette 5, hasta alcanzar una granulometría homogénea adecuada para dicho análisis.

Por otro lado, se elaboraron briquetas (Figura 2) a partir de muestras sin pulverizar, con el objetivo de preservar su estructura particulada original para su posterior análisis mediante QEMSCAN. Para su confección, se utilizaron aproximadamente 0,5 g de muestra, 1 g de grafito, 4 g de resina epóxica y 1 g de endurecedor. La mezcla fue homogeneizada manualmente y vertida en moldes de 2,5 cm de alto por 3 cm de diámetro, dejándola curar durante unas 8 horas hasta su endurecimiento. Posteriormente, las briquetas fueron lijadas utilizando equipos especializados, comenzando con una lija de grano 80 y finalizando con una de grano 320, con el fin de obtener una superficie plana y uniforme.

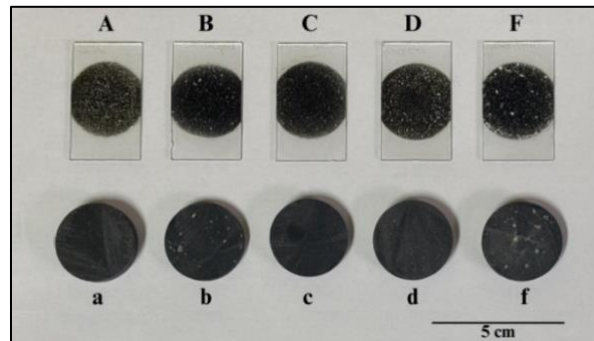


Figura 2. Vista superior de muestras. Cortes transparentes (A-F) y sus respectivas briquetas (a-f). A/a: Relave Jarosita; B/b: Relave Escondida; C/c: Relave Talcuna; D/d: Relave Goethita; F/f: Relave DMH.

Para la elaboración de cortes transparentes pulidos (Figura 2), las briquetas seleccionadas fueron finamente pulidas y adheridas a portaobjetos mediante resina. Posteriormente, se procedió al adelgazamiento del corte hasta alcanzar un espesor de aproximadamente 30 μm , adecuado para su observación en luz transmitida. Finalmente, se realizó un pulido final en dos equipos distintos, durante periodos sucesivos de 10 minutos, para obtener una superficie óptima para el análisis petrográfico.

Adicionalmente, con el objetivo de evaluar los efectos de los ensayos químicos tradicionales sobre la mineralogía de las muestras, se reutilizó el material pulverizado residual proveniente de dichos ensayos para la elaboración de nuevas briquetas. En total se prepararon diez briquetas: cinco correspondientes a muestras sometidas a la prueba ABA modificado, cinco a la prueba NP-Sobek y cinco a la prueba SPLP, las cuales fueron analizadas mediante QEMSCAN y, posteriormente, utilizadas para confeccionar cortes transparentes. Estos cortes fueron evaluados mediante microscopía óptica con el propósito de identificar posibles cambios mineralógicos inducidos por la interacción con soluciones ácidas.

En este contexto, para facilitar la identificación de las muestras y la redacción de los resultados, se optó por mantener la nomenclatura utilizada en los laboratorios y en las etiquetas de los cortes pulidos. Por ejemplo, las muestras se identificaron como “Relave Talcuna” (muestra original), “Tal-ABA” (muestra post-ensayo ABA Modificado), “Tal-NP” (muestra post-ensayo NP-Sobek) y “Tal-SPLP” (muestra post-ensayo SPLP). Este esquema de rotulación se aplicó de igual manera a las demás muestras analizadas (por ejemplo, “Relave Goethita”, “Goe-ABA”, “Goe-NP”, etc.).

3.2.2 Microscopía óptica (transmitida y refleja)

El análisis mediante microscopía óptica se realizó utilizando un microscopio para petrografía NIKON OPTIPHOT 2-POL (Figura 3). Esta herramienta permitió la observación de minerales transparentes, translúcidos y opacos en cortes delgados pulidos, utilizando distintos modos de iluminación según el tipo de análisis requerido.

La luz transmitida se aplicó en cortes delgados transparentes para identificar minerales no opacos, observar texturas y evidencias de alteración. Por su parte, la luz reflejada se utilizó para caracterizar minerales opacos, especialmente sulfuros, en función de sus propiedades ópticas, técnica conocida como calcografía.

El estudio se llevó a cabo bajo condiciones controladas de iluminación y aumentos, definidas según los requerimientos específicos de cada muestra.



Figura 3. Microscopio óptico para petrografía NIKON OPTIPHOT 2-POL.

3.2.3 Procesamiento de imágenes

Las imágenes digitales fueron obtenidas mediante una cámara digital NIKON modelo DS-Fi3 (Figura 4) acoplada al microscopio óptico, utilizando modos de luz reflejada y transmitida. El objetivo fue caracterizar morfológica y texturalmente los minerales de interés, especialmente los opacos como la pirita, documentando sus formas cristalinas, texturas de alteración y asociaciones mineralógicas. Las capturas se almacenaron en formato TIF para conservar su calidad durante los análisis posteriores.



Figura 4. Cámara digital NIKON modelo DS-Fi3 acoplada al microscopio.

3.2.4 Difracción de rayos X (DRX)

El análisis mineralógico se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), técnica semicuantitativa ampliamente utilizada para identificar fases cristalinas.

En este estudio, se analizaron cinco muestras originales pulverizadas y quince muestras post-ensayo con el objetivo de determinar su composición mineralógica. Los análisis se efectuaron utilizando un difractómetro marca Bruker, modelo D4 Endeavor (Figura 5). Los difractogramas obtenidos fueron procesados y analizados mediante el software DIFFRAC.EVA.



Figura 5. Equipo de difracción de rayos X. Marca Bruker D4 Endeavor utilizado para el análisis mineralógico de las muestras.

3.2.5 QEMSCAN

Como parte del análisis mineralógico, se realizó una evaluación cuantitativa de materiales utilizando el sistema QEMSCAN® (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*), una técnica automatizada de microscopía electrónica de barrido que permite identificar y cuantificar fases minerales, así como generar mapas de alta resolución basados en la composición química de las muestras (SERNAGEOMIN, 2015).

En este estudio se analizaron un total de veinte briquetas: cinco correspondientes a muestras originales y quince a muestras previamente sometidas a ensayos químicos, de las cuales cinco

proviene de la prueba ABA modificado, cinco de la prueba NP-Sobek y cinco de la prueba SPLP. El objetivo fue caracterizar las fases minerales presentes, evaluar la distribución de tamaños de partículas ESD (diámetro esférico equivalente en micrómetros) y comparar los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de los ensayos químicos.

Los análisis se llevaron a cabo en un microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplado al sistema QEMSCAN®, modelo E230-2, operado mediante el software iDiscover (Figura 6).

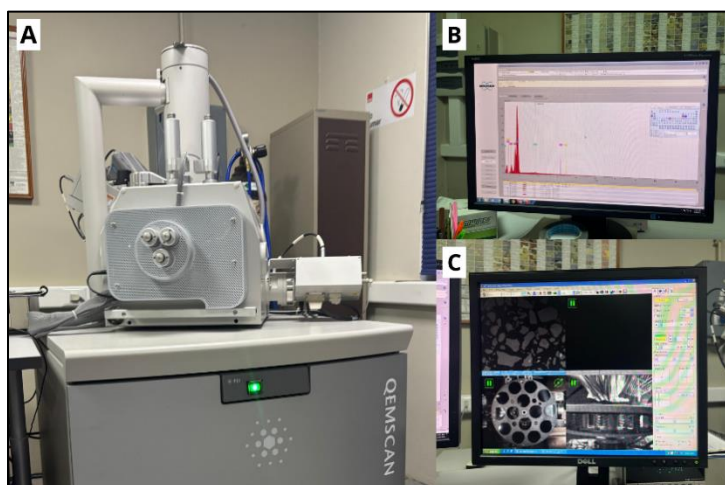


Figura 6. Sistema QEMSCAN®. A. Equipo modelo E320-2, B-C. Pantallas de resultados obtenidos mediante el software iDiscover.

3.2.6 ICP-OES

Como parte del análisis químico, se llevó a cabo una determinación multi-elemental mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), técnica que permite detectar concentraciones en el orden de partes por billón (ppb).

Para este procedimiento, se utilizó el extracto resultante de la prueba SPLP (procedimiento detallado en el apartado 3.3.5), el cual fue sometido a un proceso de digestión ácida en vaso cerrado, con calentamiento controlado mediante horno de microondas. A cada muestra se le adicionó una mezcla de reactivos compuesta por agua regia (mezcla de HNO_3 y HCl en proporción 1:3), ácido fluorhídrico (HF) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Durante la formación del agua regia, se genera cloro elemental (Cl_2) como subproducto, el cual posee un alto poder oxidante y favorece la disolución. Una vez completado este proceso, las soluciones obtenidas se llevaron a enrase con agua

desionizada y fueron utilizadas para la determinación de los elementos presentes mediante ICP-OES.

Este análisis fue ejecutado por el químico analista Gonzalo Villegas, utilizando un espectrómetro ICP-OES modelo 5110 de la marca Agilent Technologies, equipado con un muestreador automático SPS-4 y un congelador recirculante de la misma marca.

3.2.7 FAAS

El análisis químico fue complementado mediante el uso de espectroscopía de absorción atómica con llama (FAAS, por sus siglas en inglés *Flame Atomic Absorption Spectroscopy*), que permite cuantificar más de sesenta metales y metaloides de forma precisa (Skoog *et al.*, 2008). Esta técnica utiliza un atomizador de llama para generar los átomos libres necesarios y una lámpara de cátodo hueco para la estimulación, permitiendo la medición de cada elemento (Skoog *et al.*, 2008).

La preparación de las muestras para el análisis mediante FAAS siguió el mismo protocolo descrito para ICP-OES, utilizando el extracto obtenido de la prueba SPLP. Dicho extracto fue sometido a una digestión ácida, con calentamiento controlado, dilución con agua ultrapura y, en caso necesario, filtración de residuos sólidos. En este caso, el extracto fue evaluado mediante FAAS debido a que, según Villegas (2025), el análisis multi-elemental por ICP-OES presentó interferencias en ciertos elementos.

Cabe destacar que estos análisis fueron ejecutados por el químico analista Gonzalo Villegas, utilizando un espectrómetro de absorción atómica de llama, modelo 200 Series AA de la marca Agilent Technologies.

3.3 ETAPA II: ENSAYOS QUÍMICOS TRADICIONALES

Tal como se mencionó previamente, los ensayos químicos utilizados en este estudio fueron realizados por el químico analista Gonzalo Villegas, en el marco de su trabajo de título (Villegas, 2025). Los resultados obtenidos han sido incorporados en el presente trabajo como parte del análisis integrado con la caracterización mineralógica.

Cabe señalar que los resultados de los ensayos fueron incorporados tal como fueron entregados, sin modificaciones, y se consideraron las condiciones bajo las cuales fueron obtenidos al momento de interpretar su relación con los análisis mineralógicos posteriores.

3.3.1 pH y CE pasta

Para la medición de ambos parámetros, se preparó una pasta saturada mediante la mezcla de muestra pulverizada con agua desionizada. La suspensión fue mantenida bajo condiciones de humedad y oxígeno durante un período de 16 horas, asegurando una adecuada interacción entre las fases sólida y líquida. Transcurrido este tiempo, se registraron los valores de pH y conductividad eléctrica utilizando un peachímetro y un conductímetro previamente calibrado, respectivamente (Sobek *et al.*, 1978; Villegas, 2025).

3.3.2 Prueba ABA modificado

El procedimiento se desarrolla en tres etapas. Primero, se determina el NP mediante la adición de un exceso de ácido clorhídrico (HCl) estandarizado sobre la muestra, la cual se mantiene en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente (25-30 °C) para permitir la reacción de los carbonatos presentes con el ácido (MEND, 1991). Posteriormente, el exceso de HCl no neutralizado se valora con una solución estandarizada de hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzar un pH de 8,3. La diferencia entre ambos volúmenes permite estimar la capacidad neutralizante, expresada como equivalente en carbonato de calcio (CaCO₃) (MEND, 1991; Villegas, 2025).

La segunda etapa consiste en calcular el Potencial Acidificante (AP) a partir del contenido total de azufre y su fracción como sulfato, estimando por diferencia la proporción de sulfuros asociada principalmente a minerales como la pirita (MEND, 1991; Villegas, 2025).

Finalmente, se calcula el Potencial Neto de Neutralización ($NNP = NP - AP$) y la Relación de Potencial de Neutralización ($NPR = NP / AP$), la cual permite clasificar la muestra según su comportamiento ácido-base (MEND, 2009; Villegas, 2025).

3.3.3 Prueba NP-Sobek

Para la determinación del potencial de neutralización (NP) de las muestras, se aplicó la prueba NP-Sobek. Este ensayo está diseñado para cuantificar la capacidad neutralizante de los residuos mineros mediante la disolución de minerales carbonatados presentes en la muestra (MEND, 2009).

Inicialmente, se realizó una prueba de efervescencia con ácido clorhídrico (HCl) para ajustar la concentración de ácido a la reactividad específica del material (Villegas, 2025). Luego, la muestra se calentó bajo el punto de ebullición del HCl y se le adicionó la cantidad necesaria de ácido para digerir los carbonatos y silicatos más reactivos (MEND, 2009). Durante todo el procedimiento, se evitó que la mezcla alcanzara la sequedad, asegurando la presencia continua de ácido.

Finalizada la reacción y cesada la emisión de vapores, se añadió agua desionizada y se llevó la mezcla a ebullición durante un minuto. Posteriormente, el exceso de ácido no consumido fue valorado mediante titulación con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) estandarizada hasta alcanzar un pH de 7. Con ello se calculó el volumen de ácido neutralizado y se expresó el resultado como equivalente en carbonato de calcio (CaCO_3), de acuerdo con los procedimientos descritos en MEND (1991, 2009) y adaptados por Villegas (2025).

3.3.4 Prueba ABCC

El procedimiento consiste en añadir ácido clorhídrico (HCl) de forma gradual a una muestra, mientras se mide continuamente el pH de la solución (AMIRA, 2002; MEND, 2009). Este registro progresivo de los cambios en el pH permite construir una curva que refleja la capacidad de la muestra para amortiguar la acidez, la cual se completa al alcanzar un pH final entre 2,5 y 2,8 (Villegas, 2025).

La cantidad de ácido a agregar se define en función del NP previamente determinado mediante la prueba NP-Sobek. La proporción de ácido efectivamente neutralizado por la muestra se estima convirtiendo el volumen de HCl añadido en su equivalente en carbonato de calcio, expresado en kilogramos por tonelada ($\text{kg CaCO}_3/\text{t}$) (SERNAGEOMIN, 2015).

Posteriormente, se calcula el porcentaje de neutralización real (%RN) de la muestra, comparando la cantidad de ácido neutralizado con la capacidad neutralizante teórica obtenida en el NP (Villegas, 2025).

Cabe señalar que, si bien el protocolo original indica realizar adiciones de ácido cada 15 minutos, en este estudio se aplicó el reactivo en intervalos variables de 15, 5 y 3 minutos, con el objetivo de optimizar los tiempos de análisis y el uso de recursos disponibles (Villegas, 2025).

3.3.5 Prueba SPLP

Este ensayo consistió en someter la muestra a un proceso de lixiviación controlada, utilizando una solución sintética compuesta por ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) al 5 %, en una proporción 60:40 en peso. Previamente, el tamaño de partícula se redujo para cumplir con los requisitos del procedimiento. La suspensión fue mantenida bajo agitación continua durante 18 ± 2 horas a temperatura ambiente. Finalizado este proceso, el lixiviado se separó mediante filtración y se midió su pH con un peachímetro para evaluar su acidez. Posteriormente, las soluciones fueron sometidas a digestión ácida (procedimiento detallado en el apartado 3.2.6) y analizadas mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y/o espectroscopía de absorción atómica con llama (FAAS) para la cuantificación de los elementos presentes (EPA, 1994; Villegas, 2025).

3.4 ETAPA III: ANÁLISIS COMPLEMENTARIO POST-ENSAYOS QUÍMICOS

Esta etapa tuvo como propósito evaluar los efectos de los ensayos químicos tradicionales sobre la mineralogía de un conjunto de muestras tratadas. Para ello, se seleccionaron quince muestras elaboradas a partir de residuos post tratamiento, ABA Modificado, NP-Sobek y SPLP. Los resultados obtenidos fueron comparados con los análisis previos a los ensayos, con el fin de identificar posibles alteraciones mineralógicas inducidas por la interacción con soluciones ácidas.

3.4.1 Selección de muestras tratadas

La selección de las muestras se realizó en conjunto con el Químico Analista Gonzalo Villegas, considerando criterios representativos dentro del conjunto de residuos tratados. Se seleccionaron cinco muestras sometidas a la prueba ABA modificado, cinco de la prueba NP-Sobek y cinco

correspondientes a la prueba SPLP, todas asociadas a distintos relaves. En el caso de las muestras de la prueba SPLP, estas fueron previamente filtradas al vacío como parte del procedimiento del ensayo.

Las muestras seleccionadas fueron utilizadas para la elaboración de briquetas, las cuales fueron analizadas mediante QEMSCAN con el objetivo de identificar posibles cambios en la composición mineralógica, prestando especial atención a minerales carbonatados como la calcita. A partir de estas mismas briquetas se confeccionaron cortes transparentes, que fueron observados bajo microscopía óptica para evaluar variaciones texturales y mineralógicas inducidas por los ensayos químicos.

3.4.2 Evaluación comparativa pre y post tratamiento

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos antes y después de los ensayos químicos, a partir del análisis mediante microscopía óptica, DRX y QEMSCAN. Esta evaluación permitió contrastar la presencia, distribución y proporciones de minerales clave, tales como la calcita y la pirita, así como sus relaciones texturales con otros componentes. En particular, se buscó identificar disolución, redistribución o formación de nuevas fases como efecto de la interacción con soluciones ácidas.

3.5 ETAPA IV: INTEGRACIÓN DE RESULTADOS PARA LA PREDICCIÓN DE AMD

Esta etapa tuvo como objetivo integrar los resultados obtenidos mediante técnicas mineralógicas (microscopía óptica, DRX y QEMSCAN), métodos de análisis elemental (ICP-OES y FAAS) y ensayos químicos (ABA modificado, NP-Sobek, ABCC y SPLP) para correlacionar la composición mineral, las texturas observadas y la reactividad de las muestras.

El análisis conjunto permitió reconocer coincidencias y diferencias entre los enfoques mineralógicos y químicos, y evaluar qué técnicas aportan información más representativa del comportamiento acidificante o neutralizador de los materiales. Además, permitió identificar limitaciones en los ensayos químicos tradicionales, especialmente en su capacidad para incorporar variables mineralógicas claves, como la presencia de carbonatos o la textura de los sulfuros.

Finalmente, esta integración constituye un paso clave hacia el desarrollo de un protocolo metodológico que combine ambas líneas de análisis. Dicha aproximación busca mejorar la precisión en la predicción del AMD, respondiendo a la necesidad de contar con herramientas más completas y adaptadas a las condiciones de pasivos mineros.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

4.1.1 Microscopía óptica

A continuación, se resumen las principales diferencias mineralógicas entre los relaves, con énfasis en la presencia de piritita y calcita.

4.1.1.1 Muestras del relave Talcuna

La muestra original presentó cristales bien desarrollados de calcita (Figura 7-A), junto con feldspatos y micas alteradas observadas en luz transmitida. En luz reflejada se identificaron calcopirita ocluida, magnetita y hematita, sin evidencias de piritita. En contraste, las muestras tratadas (Tal-ABA, Tal-NP y Tal-SPLP) exhibieron aglomerados de fases minerales oxidadas de hierro, compuestos principalmente por goethita y limonita. Estos aglomerados no representan texturas naturales, sino que probablemente se formaron durante la conminución en la preparación de las muestras. Presentan morfologías subédricas a irregulares, con zonación interna y minerales opacos incluidos, como magnetita, hematita y, en menor proporción, calcopirita (Figuras 7-B, 7-C y 7-D). Estas observaciones evidencian una disminución progresiva de la calcita.

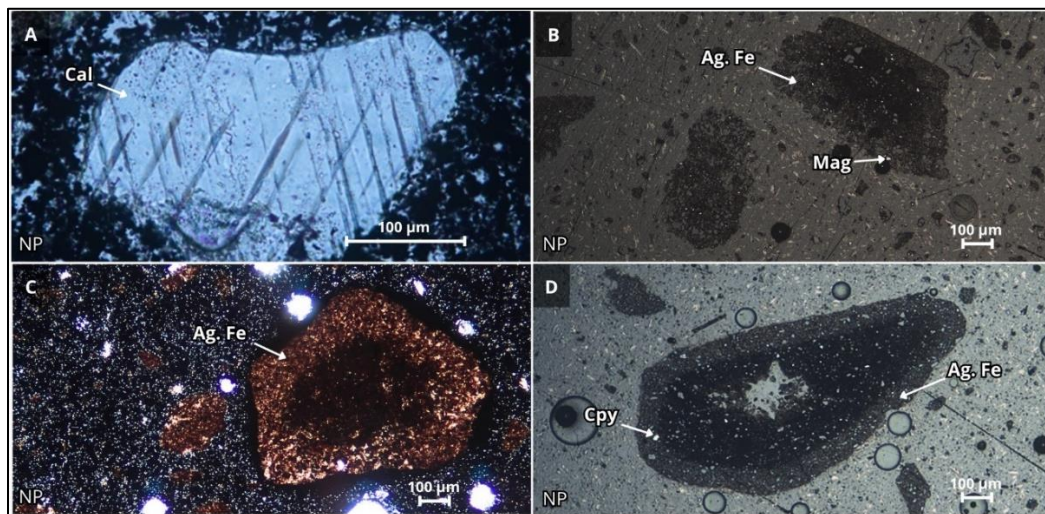


Figura 7. Microfotografías de las muestras del relave Talcuna. A: Calcita (Cal) en muestra original (luz transmitida, NP, 20×). B: Aglomerado de oxidados de hierro (Ag. Fe) con inclusiones de magnetita (Mag), muestra Tal-ABA (luz reflejada, NP, 5x). C: Aglomerado de oxidados de hierro (Ag. Fe), muestra Tal-NP (luz transmitida, NP, 5x). D: Aglomerado de oxidados de hierro (Ag. Fe) con zonación interna e inclusiones opacas, asociado a calcopirita (Cpy), muestra Tal-SPLP (luz transmitida, NP, 5x).

4.1.1.2 Muestras del relave Goethita

La muestra original presentó cristales diseminados y cúmulos de calcita (Figura 8-A), junto con pirita principalmente diseminada y parcialmente ocluida, así como magnetita, hematita y limonita. En las muestras tratadas (Goe-ABA, Goe-NP y Goe-SPLP), se observaron aglomerados de oxidados de Fe (Figura 8-D) similares a los descritos en Talcuna, compuestos por goethita, limonita y jarosita. Estos aglomerados exhiben morfologías subhedrales a anhedrales, con formas tabulares y zonación interna. Entre los minerales opacos, destacaron magnetita y hematita, comúnmente incluidas en el interior de los aglomerados (Figura 8-B), mientras que la pirita se mantuvo en baja proporción, diseminada u ocluida (Figura 8-C). La calcita no fue identificada en las muestras postratamiento.

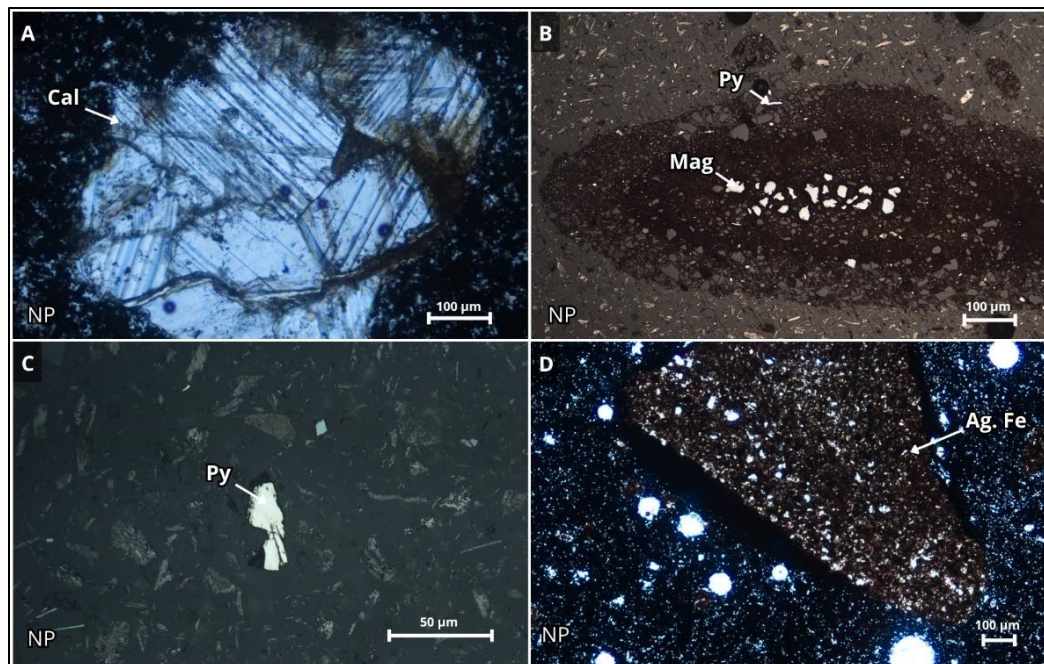


Figura 8. Microfotografías de muestras del relave Goethita. A: Cúmulo de calcita (Cal) en muestra original (luz transmitida, NP, 10x). B: Aglomerado de oxidados de hierro con magnetita (Mag) y pirita (Py), muestra Goe-ABA (luz reflejada, NP, 10x). C: Pirita (Py) diseminada en matriz, muestra Goe-NP (luz reflejada, NP, 40x). D: Aglomerado de oxidados de hierro (Ag. Fe) de morfología subredondeada, muestra Goe-SPLP (luz transmitida, NP, 5x).

4.1.1.3 Muestras del relave Jarosita

En la muestra original no se identificó calcita, pero sí cuarzo, epidota, magnetita-hematita y pirita fragmentada, de bordes angulosos, diseminada en la matriz (Figura 9-A) y parcialmente ocluida. Tras los tratamientos (Jar-ABA, Jar-NP y Jar-SPLP), se observaron aglomerados de oxidados de hierro similares a los presentes en relaves mencionados anteriormente, compuestos por limonita,

jarosita y goethita con inclusiones de minerales opacos como pirita, magnetita y hematita (Figura 9-B). Estas fases aparecieron principalmente en los aglomerados, aunque también se reconocieron de forma diseminada. Se logra reconocer una reducción en la granulometría de los sulfuros residuales.

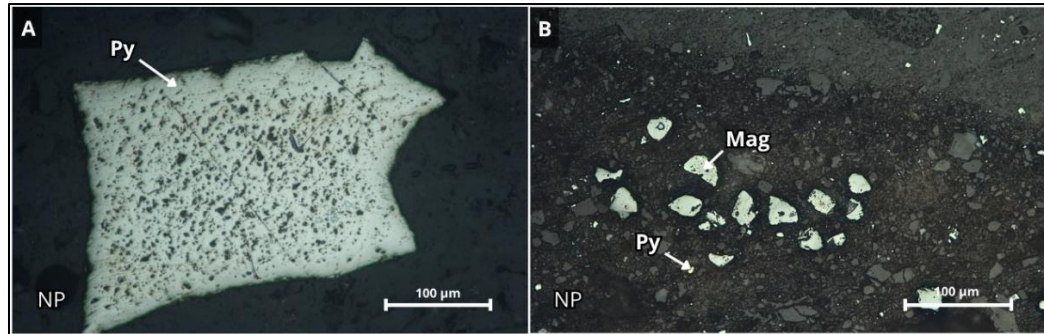


Figura 9. Microfotografías de muestras del relave Jarosita. A: Cristal de pirita, con bordes angulosos en la muestra original (luz reflejada, NP, 20x). B: Aglomerado de oxidados de hierro con inclusiones de magnetita (Mag) y pirita (Py) ocluidas, muestra Jar-NP (luz reflejada, NP, 20x).

4.1.1.4 Muestras del relave Escondida

En la muestra original se identificaron cuarzo, feldespatos, moscovita, biotita y clorita, sin presencia de calcita. En luz reflejada se observaron pirita, calcopirita y magnetita, con pirita diseminada y ligeramente ocluida, de bordes subangulosos (Figura 10-A). A diferencia de los demás relaves, en las muestras tratadas (Esc-ABA, Esc-NP y Esc-SPLP) no se observaron aglomerados férricos, sino aglomerados silicatados compuestos principalmente por cuarzo, feldespatos y moscovita, con morfologías tabulares a subredondeadas y contornos difusos (Figuras 10-B y 10-D). La presencia de calcopirita y magnetita fue mínima, limitada a unos pocos granos aislados. En estas muestras, la pirita se observó en tamaños menores, diseminada u ocluida en la matriz (Figura 10-C).

4.1.1.5 Muestras del relave DMH

La muestra original mostró cristales gruesos de cuarzo con evidentes signos de alteración, acompañados por cúmulos de moscovita, y minerales opacos como pirita fragmentada, de bordes angulosos, diseminada en la matriz (Figura 11-A), además de calcopirita, magnetita-hematita y limonita. Tras los tratamientos (DMH-ABA, DMH-NP y DMH-SPLP), se identificaron aglomerados silicatados de grano fino, similares a los observados en Escondida, compuestos por cuarzo, feldespatos y micas (Figura 11-B). Los minerales opacos, como pirita, calcopirita y

magnetita-hematita, se encontraron principalmente disseminados en la matriz y, en menor proporción, ocluidos dentro de los aglomerados.

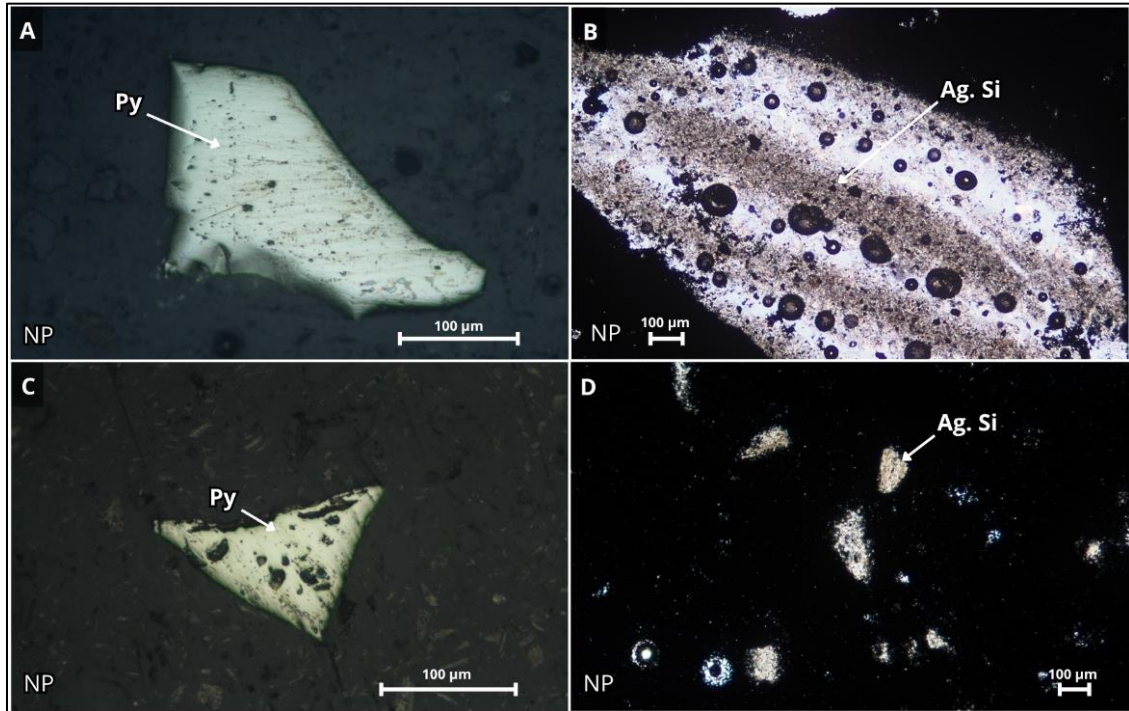


Figura 10. Microfotografías de muestras del relave Escondida. A: Pirita (Py) disseminada con bordes subangulosos, en muestra original (luz reflejada, NP, 20x). B: Aglomerado silicatado (Ag. Si), compuesto por cuarzo, feldespatos y micas, muestra Esc-ABA (luz transmitida, NP, 5x). C: Pirita de menor tamaño disseminada en la matriz, muestra Esc-NP (luz reflejada, NP, 20x). D: Aglomerado silicatado (Ag. Si) con contornos irregulares, muestra Esc-SPLP (luz transmitida, NP, 5x).

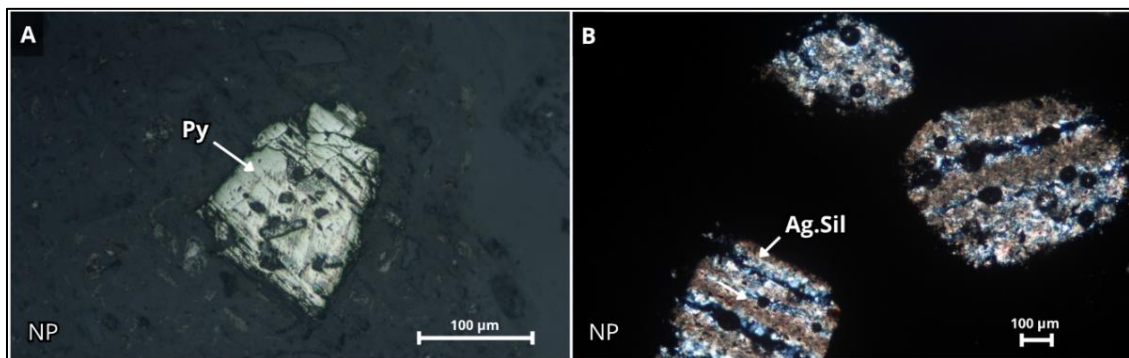


Figura 11. Microfotografías de muestras del relave DMH. A: Pirita (Py) fragmentada, de bordes angulosos, disseminada en la matriz, muestra original (luz reflejada, NP, 20x). B: Aglomerado silicatado (Ag.Sil) de grano fino, muestra DMH-NP (luz transmitida, NP, 5x).

4.1.2 Difracción de rayos X (DRX)

Se realizó análisis de difracción de rayos X (DRX) sobre las muestras de relaves y sus tratamientos con el objetivo de identificar los principales grupos mineralógicos presentes y comparar su abundancia relativa. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos, agrupados en silicatos, sulfuros, carbonatos, sulfatos y óxidos de Fe/Al.

Tabla 2. Distribución semicuantitativa de grupos mineralógicos por muestra según análisis DRX. El detalle completo de las fases minerales identificadas para cada muestra se presenta en el Anexo 1 (Tablas 1-5).

<i>Muestra</i>	<i>Sulfuros (%)</i>	<i>Carbonatos (%)</i>	<i>Sulfatos (%)</i>	<i>Óxidos Fe/Al (%)</i>	<i>Silicatos (%)</i>
<i>R. Talcuna</i>	0,00	7,40	2,30	1,20	89,1
<i>Tal-ABA</i>	0,00	0,00	2,40	3,10	94,6
<i>Tal-NP</i>	0,00	0,00	1,50	3,10	95,3
<i>Tal-SPLP</i>	0,00	2,90	0,00	6,30	90,7
<i>R. Goethita</i>	0,90	2,10	2,60	3,10	91,2
<i>Goe-ABA</i>	0,70	0,00	1,60	2,20	95,6
<i>Goe-NP</i>	1,20	0,00	1,30	2,40	95,2
<i>Goe-SPLP</i>	0,60	2,00	0,00	3,50	93,8
<i>R. Jarosita</i>	1,10	0,00	9,50	2,40	87,0
<i>Jar-ABA</i>	4,90	0,00	6,80	2,70	85,6
<i>Jar-NP</i>	2,40	0,00	2,30	2,70	92,5
<i>Jar-SPLP</i>	1,30	0,00	3,80	1,50	93,4
<i>R. Escondida</i>	0,80	0,00	0,00	0,00	99,2
<i>Esc-ABA</i>	0,40	0,00	0,00	0,00	99,5
<i>Esc-NP</i>	0,90	0,00	0,00	0,00	99,1
<i>Esc-SPLP</i>	0,90	0,00	4,40	0,00	94,9
<i>R. DMH</i>	0,50	0,80	1,50	0,00	97,2
<i>DMH-ABA</i>	0,40	0,90	0,90	0,00	97,8
<i>DMH-NP</i>	0,50	0,20	0,60	0,00	98,7
<i>DMH-SPLP</i>	0,30	0,60	2,80	0,00	96,3

En general, los silicatos dominaron ampliamente en todas las muestras (>85 %), siendo el grupo más abundante tanto en los relaves originales como en las muestras tratadas.

No obstante, observaron diferencias relevantes entre las muestras y tratamientos en los grupos minoritarios, compuestos por sulfuros, carbonatos, sulfatos y óxidos de Fe/Al, como se ilustra en la Figura 12.

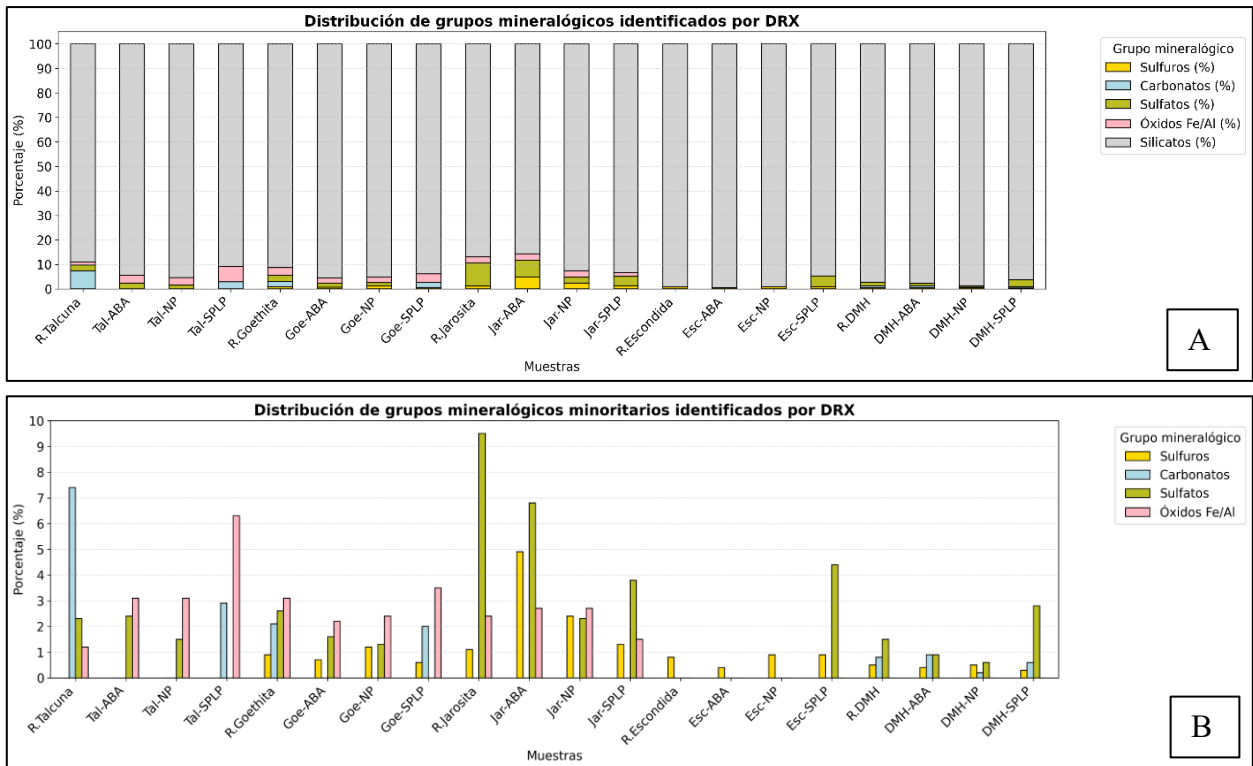


Figura 12. Distribución semicuantitativa de grupos mineralógicos identificados por DRX. A. Proporción relativa de los grupos mayoritarios en cada muestra. B. Detalle de los grupos mineralógicos minoritarios ($\leq 10\%$) para facilitar su visualización comparativa.

Entre los relaves originales, Jarosita presentó la mayor proporción de sulfatos (9,50 %) y un contenido significativo de sulfuros (1,10 %), los cuales aumentaron en los tratamientos ABA (4,90 %) y NP (2,40 %). Goethita mostró menores proporciones de estos grupos (hasta 2,60 % en sulfatos y 1,20 % en sulfuros), junto con carbonatos en algunas muestras tratadas, como Goe-SPLP (2,00 %). En tanto, DMH presentó una mineralogía intermedia, con sulfatos de hasta 2,80 %, sulfuros entre 0,30 % y 0,50 %, y carbonatos en rangos de 0,20 % a 0,90 %.

Las muestras de Talcuna presentaron inicialmente un contenido notable de carbonatos (7,40 %), representados principalmente por calcita, que no fue detectada tras los tratamientos ABA y NP. También se identificaron sulfatos como yeso y baritina, así como óxidos como hematita, cuya proporción aumentó en Tal-SPLP (6,30 %).

Las muestras de Escondida estuvieron compuestas casi exclusivamente por silicatos (hasta 99,5 %), sin detección significativa de sulfuros, carbonatos ni óxidos. No obstante, Esc-SPLP presentó un contenido de sulfatos de 4,40 %, no registrado en las otras condiciones de esta muestra. Los óxidos

de Fe/Al, aunque en baja proporción, se detectaron principalmente en las muestras tratadas, con valores destacados en Tal-SPLP y Goe-SPLP, donde se identificaron fases como hematita o magnetita.

4.1.3. Resultados QEMSCAN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante QEMSCAN, organizados por muestra. Se incluye información sobre composición mineral, asociaciones relevantes entre fases (como pirita y calcita) y grado de liberación, ilustrada mediante tablas y figuras.

4.1.3.1 Muestras del relave Talcuna

La muestra original de Talcuna presentó un contenido muy bajo de sulfuros (0,21 %), entre ellos pirita y calcopirita. La calcita fue el único carbonato con proporción relevante (4,62 %), lo que sugiere cierto potencial neutralizante inicial. Tras los tratamientos (ABA, NP y SPLP), se observó una disminución significativa de la calcita (<1,00 %) y un aumento relativo de óxidos de hierro como limonita. Los silicatos fueron la fase dominante en todas las muestras (Tabla 3).

Tabla 3. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Talcuna (% en masa). Para el detalle por especie mineral y tamaños de grano, Anexo 2.1, Tabla 6.

<i>Grupo Mineralógico</i>	<i>Mineral Principal</i>	<i>Relave Talcuna (%)</i>	<i>Tal-ABA (%)</i>	<i>Tal-NP (%)</i>	<i>Tal-SPLP (%)</i>
Sulfuros	Pirita, Calcopirita	0,21	0,12	0,10	0,15
Carbonatos	Calcita	4,62	0,02	0,02	0,87
Sulfatos	Alunita, Yeso, Baritina	0,85	0,62	0,37	0,29
Óxidos e Hidróxidos	Rutilo, Limonita	4,30	5,59	5,51	3,49
Silicatos	Cuarzo, Feldespatos, Micas	84,95	90,75	90,64	86,01

Las asociaciones de pirita con jarosita, calcopirita y otros minerales fueron puntuales y sin un patrón claro. Sin embargo, esta asociación debe tomarse con cautela debido a la baja proporción de pirita en la muestra, por lo que no sería representativa. En cuanto a la calcita, se identificaron asociaciones principalmente con wollastonita, granate, esfalerita y epidota, las que disminuyeron tras los tratamientos (Figura 13). Si bien estas relaciones no son dominantes, podrían influir en la respuesta neutralizante y la reactividad superficial del mineral (Anexo 2.2, Tabla 11).

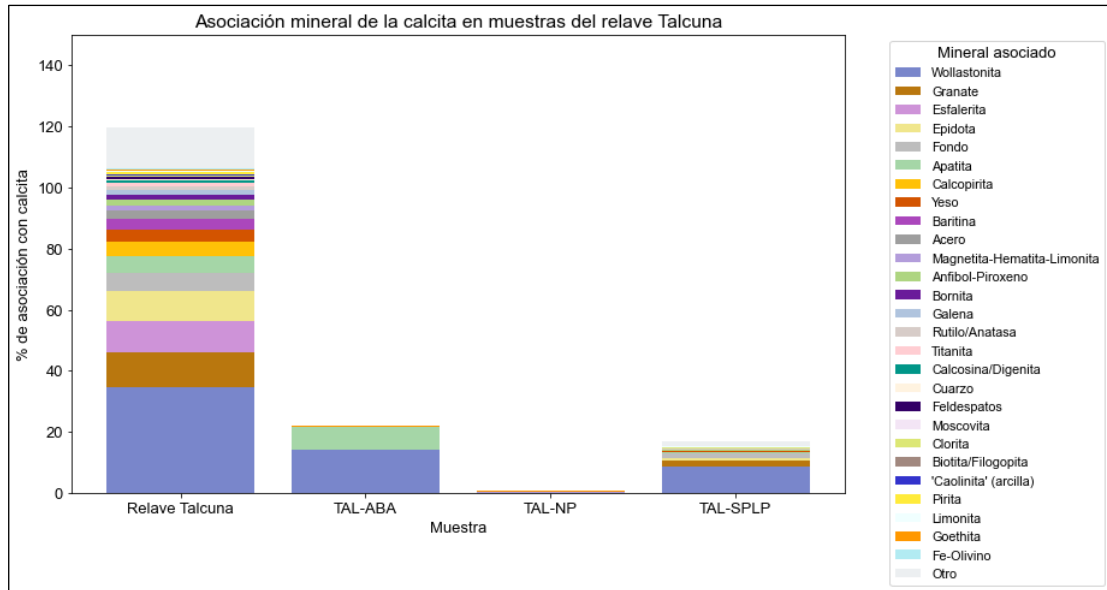


Figura 13. Variación de asociaciones minerales de la calcita entre tratamientos del relave Talcuna.

La pirita, presente en $<0,05\%$, mostró oclusión total en la muestra original y una aparente mejora tras SPLP ($66,67\%$), aunque su baja abundancia limita la representatividad del dato (Anexo 2.3, Tabla 16). Las muestras postratamiento evidenciaron una disminución en el tamaño de grano (Figura 14), lo que favorecería una mayor exposición de minerales reactivos.

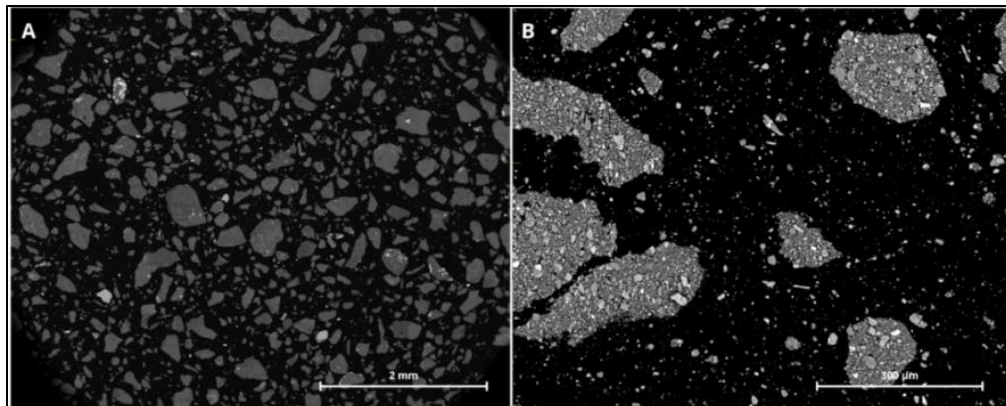


Figura 14. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Talcuna. A. Muestra relave Talcuna. B. Muestra Tal-SPLP, se observa una disminución en el tamaño de grano tras el tratamiento. Debido a la baja abundancia de pirita ($<0,05\%$), no es posible visualizarla directamente ni evaluar con certeza su liberación.

La liberación de calcita fue más representativa: en el relave original, más del $50,00\%$ se encontró en estado liberado, mientras que en Tal-NP alcanzó un $100,00\%$. Las muestras Tal-ABA y Tal-SPLP

presentaron distribuciones más heterogéneas, con fracciones ocluidas superiores al 39,00 % (Anexo 2.3, Tabla 17).

4.1.3.2 Muestras del relave Goethita

La muestra original del relave Goethita presentó un contenido moderado de sulfuros (2,70 %), con pirita como mineral predominante (2,54 %) y un tamaño medio de grano de 32,41 μm . La calcita se identificó en un 1,74 %, y aunque en proporciones mayores que en otros relaves, su contenido sigue siendo bajo. Los sulfatos estuvieron presentes en cantidades <1,00. Los óxidos de hierro alcanzaron un 19,98 %, con limonita como fase principal, mientras que los silicatos representaron el grupo dominante (~71,00 %) (Tabla 4).

Tabla 4. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Goethita (% en masa). Para el detalle por especie mineral y tamaños de grano, Anexo 2.1, Tabla 7.

Grupo Mineralógico	Mineral Principal	Relave Goethita (%)	Goe-ABA (%)	Goe-NP (%)	Goe-SPLP (%)
Sulfuros	Pirita, Calcopirita	2,70	1,40	1,29	1,04
Carbonatos	Calcita	1,74	0,04	0,02	1,04
Sulfatos	Jarosita, Alunita, Yeso	0,52	0,74	0,94	0,76
Óxidos e Hidróxidos	Limonita, Goethita, Magnetita	19,98	19,65	19,30	13,58
Silicatos	Cuarzo, Feldespatos	71,08	73,98	74,32	76,13

En la muestra original, la pirita mostró asociaciones predominantes con jarosita (15,55 %) y galena (14,23 %), además de relaciones menores con esfalerita, alunita y calcopirita. Estas asociaciones variaron en las muestras tratadas, donde se observó un mayor vínculo con oxidados de hierro (como magnetita-hematita-limonita y goethita) (Figura 15).

La calcita, por su parte, en la muestra original se asoció principalmente con wollastonita (33,38 %), seguida de granate y apatita; sin embargo, en las muestras postratamiento dada su baja abundancia general, estas relaciones no serían determinantes (Anexo 2.2, Tabla 12).

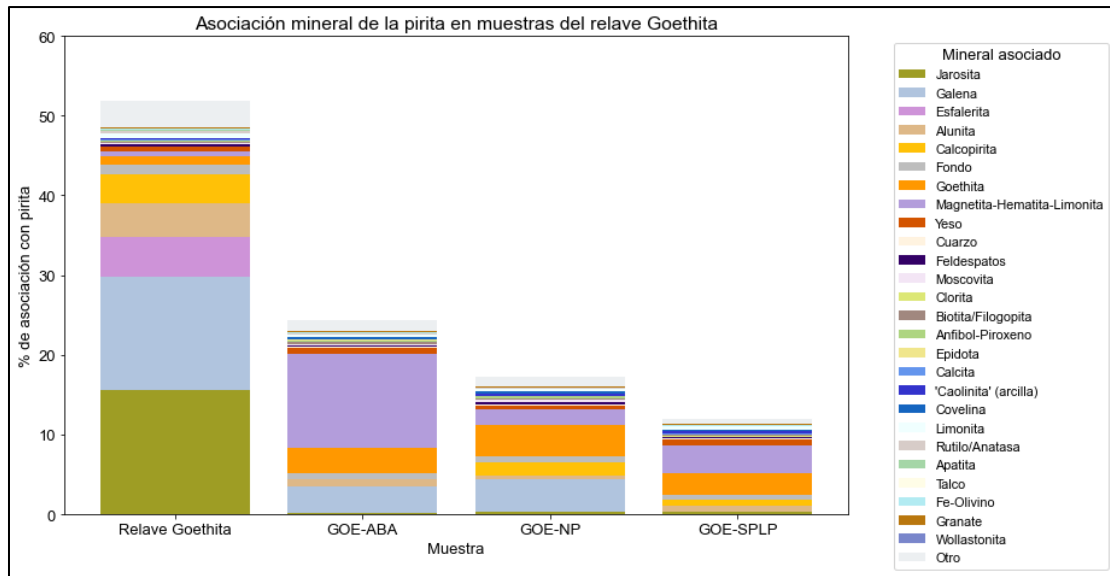


Figura 15. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Goethita.

La pirita presentó una alta proporción en la fracción liberada en el relave Goethita (81,96%), mientras que las fracciones ocluidas y moderadamente ocluidas fueron bajas. Tras los tratamientos, se evidenció una disminución en su liberación y un aumento en su oclusión, particularmente en Goe-NP (50,42 %) (Anexo 2.3, Tabla 18), posiblemente debido a la formación de aglomerados minerales observados en QEMSCAN (Figura 16), así como con la reducción del tamaño de grano registrada en las muestras postratamiento en comparación con la muestra original.

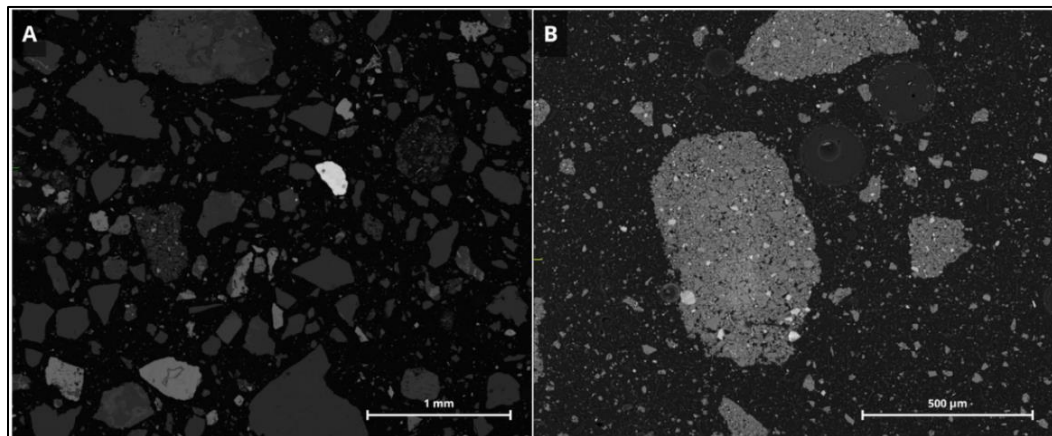


Figura 16. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Goethita. A. muestra relave Goethita, donde los sulfuros se observan principalmente como fases liberadas. B. muestra Goe-NP, con sulfuros contenidos en aglomerados minerales.

La calcita presentó una liberación elevada en el relave original (72,84 %), la cual disminuyó en las muestras tratadas. En Goe-ABA se registró un aumento en la fracción ocluida (75,00 %) (Anexo 2.3, Tabla 19), reflejando una menor accesibilidad de este mineral, aunque su baja concentración limita la interpretación de estos resultados.

4.1.3.3 Muestras del relave Jarosita

El relave Jarosita presentó un contenido elevado de sulfuros (3,89 %), con predominio de pirita, cuya proporción fue levemente superada en las muestras postratamiento (hasta 4,66 %). La calcita estuvo presente en proporciones bajas en todas las muestras (<0,30 %), por lo que su contribución neutralizante sería limitada. En cuanto a los sulfatos, se observó un aumento significativo tras los tratamientos, con jarosita como fase predominante. Los óxidos de hierro también aumentaron, destacando la limonita, especialmente en Jar-ABA y Jar-SPLP. Finalmente, los silicatos, aunque dominantes en la muestra original (72,53 %), disminuyeron en las muestras tratadas (≈45,00 %) (Tabla 5).

Tabla 5. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Jarosita (% en masa). Para el detalle por especie mineral y tamaños de grano, Anexo 2.1, Tabla 8.

Grupo Mineralógico	Minerales Principales	Relave Jarosita (%)	JAR-ABA (%)	JAR-NP (%)	JAR-SPLP (%)
Sulfuros	Pirita	3,89	4,66	4,56	4,36
Carbonatos	Calcita	0,10	0,03	0,03	0,28
Sulfatos	Jarosita	3,29	14,20	9,64	12,32
Óxidos e Hidróxidos	Limonita, Goethita, Magnetita-Hematita-Limonita	16,44	27,20	33,65	19,80
Silicatos	Cuarzo, Feldespatos, Micas	72,53	45,94	46,30	44,74

La pirita presentó asociaciones predominantes con calcopirita, goethita, esfalerita y jarosita en la muestra original, mientras que en las muestras tratadas se mantuvo el contacto con jarosita y se añadieron asociaciones menores con yeso y titanita (Figura 17). Estas relaciones, junto con el aumento de fases oxidadas, son indicativas de un entorno geoquímico oxidante que podría afectar la movilidad del hierro y del azufre. En cuanto a la calcita, esta se asoció principalmente con wollastonita en todas las muestras (Anexo 2.2, Tabla 13), aunque su baja abundancia restringe su rol como neutralizante efectivo.

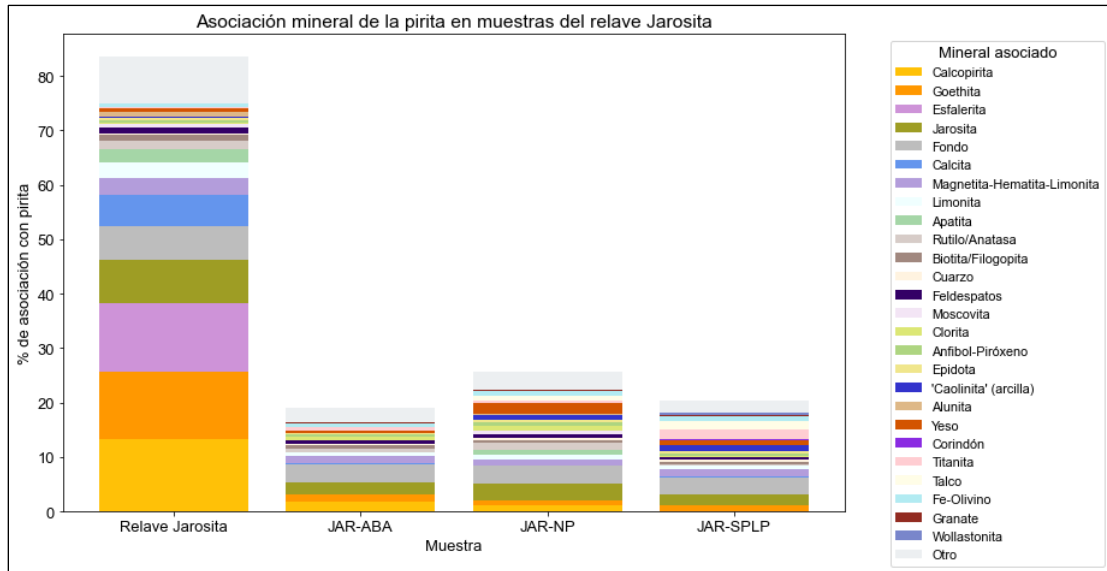


Figura 17. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Jarosita.

La pirita mostró en el relave Jarosita una ligera predominancia en la fracción liberada (39,95 %) sobre la ocluida (35,05 %). Sin embargo, tras los tratamientos se incrementó la proporción ocluida, alcanzando un 51,96 % en Jar-SPLP, mientras que Jar-ABA y Jar-NP conservaron una mayor proporción liberada (53,25 % y 46,04 %, respectivamente) (Anexo 2.3, Tabla 20). Estas variaciones se reflejan en las imágenes QEMSCAN (Figura 18), donde en Jar-SPLP se observan aglomerados que favorecen la oclusión de la pirita.

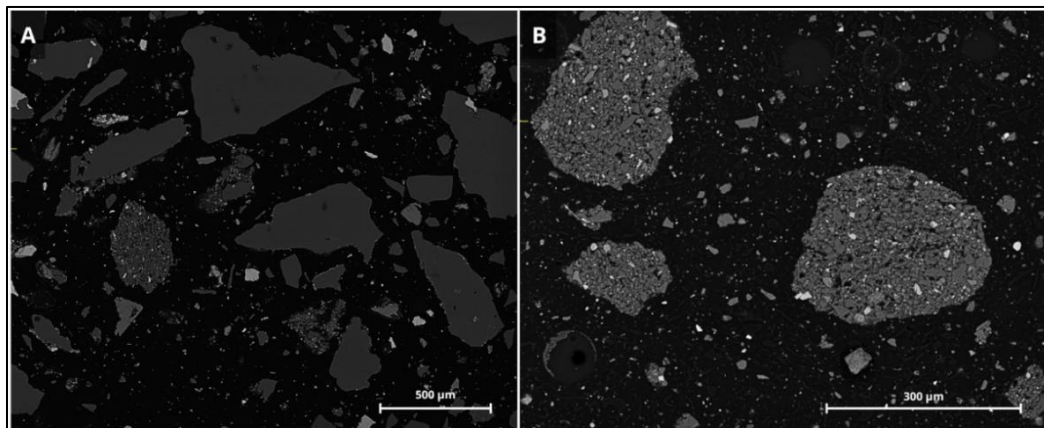


Figura 18. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Jarosita. A. muestra relave Jarosita, con distribución más dispersa de minerales. B. muestra Jar-SPLP, donde los minerales aparecen en aglomerados, concordando con su mayor proporción ocluida.

La calcita, por su parte, presentó liberación nula en el relave original (100,00 % ocluida), mientras que en Jar-SPLP alcanzó un 50,00 % de liberación. En Jar-ABA y Jar-NP se observó un 33,33 % de partículas liberadas, aunque estas proporciones no serían representativas dada la baja concentración del mineral (Anexo 2.3, Tabla 21). En general, las muestras tratadas exhibieron una disminución en el tamaño medio de grano, lo que podría aumentar la reactividad superficial de las fases remanentes.

4.1.3.4 Muestras del relave Escondida

El relave Escondida presentó un contenido moderado de sulfuros (3,63 %), con pirita como mineral dominante (2,96 %). Esta pirita mostró un tamaño de grano relativamente grueso en la muestra original (~58,20 μm), lo que contrasta con los valores más bajos observados en Esc-SPLP (~10,70 μm). Los carbonatos y sulfatos estuvieron presentes en proporciones muy bajas (<0,40 %), sin variaciones significativas entre muestras. Los silicatos fueron el grupo dominante en todas las muestras (>93,00 %) (Tabla 6).

Tabla 6. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave Escondida (% en masa). Para el detalle por especie mineral y tamaños de grano, Anexo 2.1, Tabla 9.

<i>Grupo Mineralógico</i>	<i>Minerales principales</i>	<i>Relave Escondida (%)</i>	<i>ESC-ABA (%)</i>	<i>ESC-NP (%)</i>	<i>ESC-SPLP (%)</i>
<i>Sulfuros</i>	Pirita, Calcopirita	3,63	3,19	3,24	1,50
<i>Carbonatos</i>	Calcita	0,01	0,02	0,01	0,02
<i>Sulfatos</i>	Alunita, Yeso, Jarosita	0,25	0,18	0,26	0,31
<i>Óxidos e Hidróxidos</i>	Rutilo-Anatasa	1,73	1,28	1,45	2,08
<i>Silicatos</i>	Cuarzo, Feldespatos, Micas	93,30	94,38	94,12	94,48

En la muestra original, la pirita se encontró principalmente asociada con bornita, calcopirita y jarosita, además de presentar vínculos menores con molibdenita y esfalerita. Tras los tratamientos aplicados, algunas de estas asociaciones se mantuvieron. En la muestra Esc-ABA, se registró una asociación del 100,00 % con esfalerita, mientras que en Esc-SPLP se evidenció una disminución en la diversidad mineral, destacando la goethita como fase predominante (Figura 19; Anexo 2.2, Tabla 14). La calcita no presentó asociaciones mineralógicas significativas en las muestras analizadas (Anexo 2.2, Tabla 14), y debido a su baja concentración, su contribución al comportamiento geoquímico del sistema sería marginal.

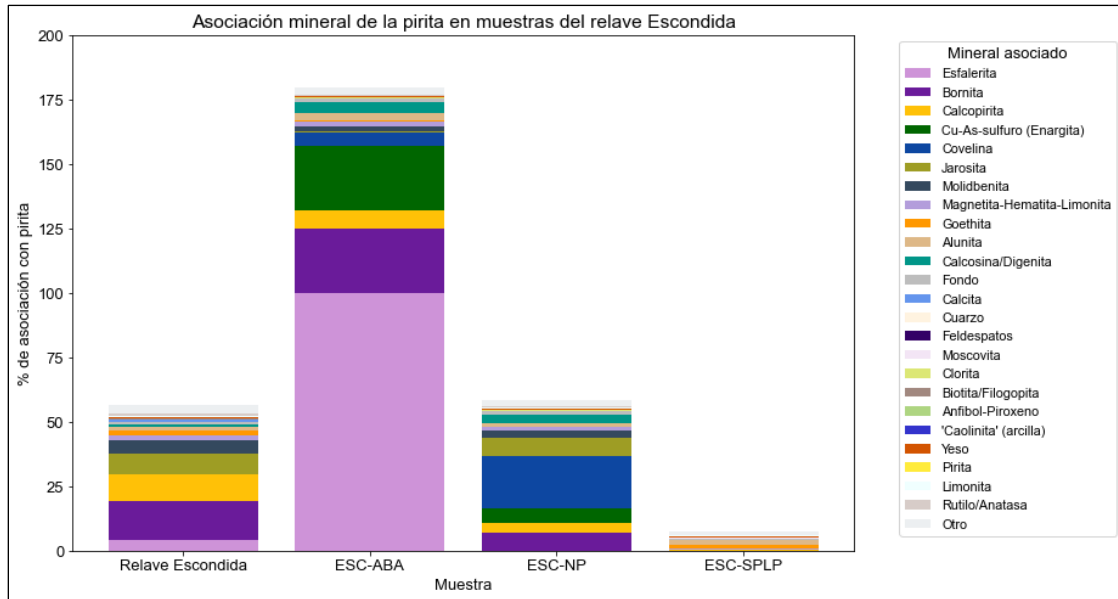


Figura 19. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave Escondida.

En todas las muestras analizadas del relave Escondida, la pirita presentó una alta proporción en la clase liberada ($\geq 70,00\%$), superando el $90,00\%$ en el relave original ($90,58\%$), Esc-ABA ($91,95\%$) y Esc-NP ($92,10\%$). En contraste, Esc-SPLP presentó una leve disminución en la proporción liberada ($80,16\%$), junto con un aumento en las fracciones moderadamente ocluida ($12,40\%$) y ocluida ($7,44\%$) (Anexo 2.3, Tabla 22). Esta redistribución podría estar relacionada con la formación de aglomerados minerales observada en QEMSCAN (Figura 20), la cual coincide con una disminución del tamaño de grano en las muestras postratamiento.

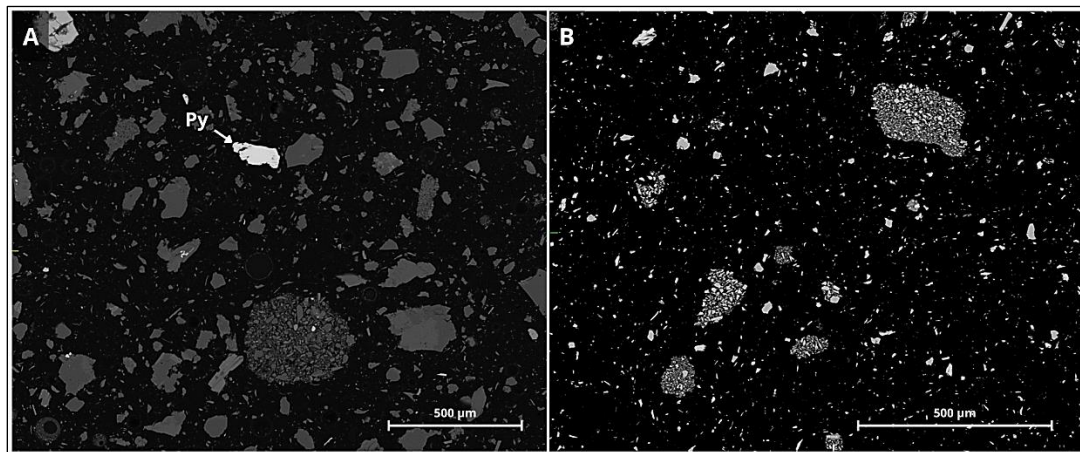


Figura 20. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave Escondida. A. muestra relave Escondida, donde la pirita se encuentra principalmente en forma liberada. B. muestra Esc-SPLP, con abundancia de aglomerados minerales.

La calcita se detectó en todas las muestras en proporciones mínimas (<0,02 %) y completamente liberada (Anexo 2.3, Tabla 23). Aunque esto sugiere un bajo potencial neutralizante, su escasa presencia la vuelve irrelevante.

4.1.3.5 Muestras del relave DMH

La muestra original del relave DMH presentó un contenido bajo de sulfuros (1,74 %), con predominio de pirita y calcopirita. Esta pirita mostró el mayor tamaño de grano entre las muestras (~34,11 μm), en contraste con las tratadas, donde disminuyó progresivamente. La calcita y los sulfatos estuvieron presentes en proporciones bajas, mientras que los óxidos e hidróxidos registraron contenidos levemente superiores (1,97 %), con rutilo-anatasa y magnetita-hematita-limonita como fases principales. Los silicatos fueron dominantes en todas las muestras (>91,00 %) (Tabla 7).

Tabla 7. Composición mineral por grupo mineralógico en muestras del relave DMH (% en masa). Para el detalle por especie mineral y tamaños de grano, Anexo 2.1, Tabla 10.

Grupo Mineralógico	Minerales Principales	Relave DMH (%)	DMH-ABA (%)	DMH-NP (%)	DMH-SPLP (%)
Sulfuros	Pirita, Calcopirita, Calcosina-Digenita	1,74	1,18	1,40	1,06
Carbonatos	Calcita	0,30	0,01	0,02	0,20
Sulfatos	Alunita, Yeso	0,78	0,57	0,48	1,39
Óxidos e Hidróxidos	Rutilo-anatasa, Magnetita-Hematita-Limonita	1,97	1,58	1,21	2,54
Silicatos	Cuarzo, Feldespatos, Micas	91,36	95,66	96,08	91,34

En la muestra original, la pirita se asoció principalmente con calcopirita (7,21 %), seguida de esfalerita, jarosita y óxidos de hierro. Estas asociaciones se mantuvieron parcialmente en las muestras tratadas, aunque en DMH-SPLP destacó una vinculación distintiva con bornita (10,00 %) y calcosina-digenita (Figura 21). La calcita, por su parte, se asoció mayoritariamente con wollastonita (28,81 %), junto a vínculos menores con epidota, granate y esfalerita; no obstante, dada su baja abundancia, estas asociaciones carecen de mayor relevancia interpretativa (Anexo 2.2, Tabla 15).

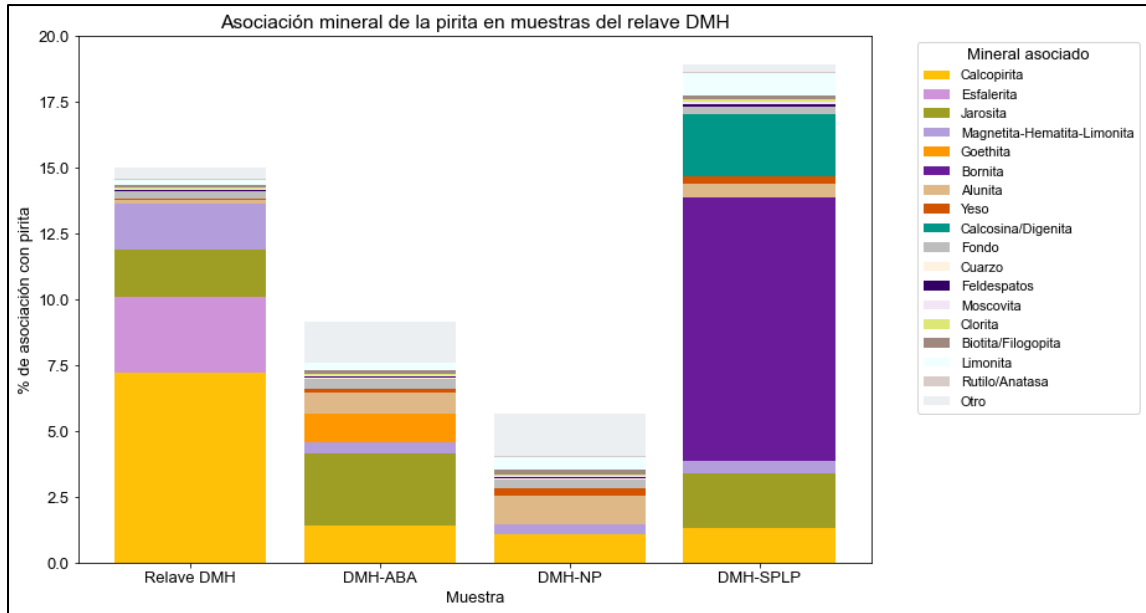


Figura 21. Variación de asociaciones minerales de la pirita entre tratamientos del relave DMH.

La liberación de pirita en el relave DMH fue significativa, con un 67,19 % de partículas en la fracción liberada. En las muestras tratadas, los porcentajes liberados aumentaron, especialmente en DMH-NP (85,29 %) y DMH-ABA (78,67 %), mientras que DMH-SPLP presentó un valor más bajo (60,94 %), junto a un aumento de pirita ocluida (18,75 %) posiblemente asociado a la formación de aglomerados silicatados (Figura 22) (Anexo 2.3, Tabla 24). La calcita en la muestra original se encontró mayoritariamente ocluida (50,00 %), con baja liberación (26,66 %). Las muestras tratadas presentaron una mayor liberación; sin embargo, debido al bajo contenido de este mineral, estos datos deben interpretarse con cautela (Anexo 2.3, Tabla 25).

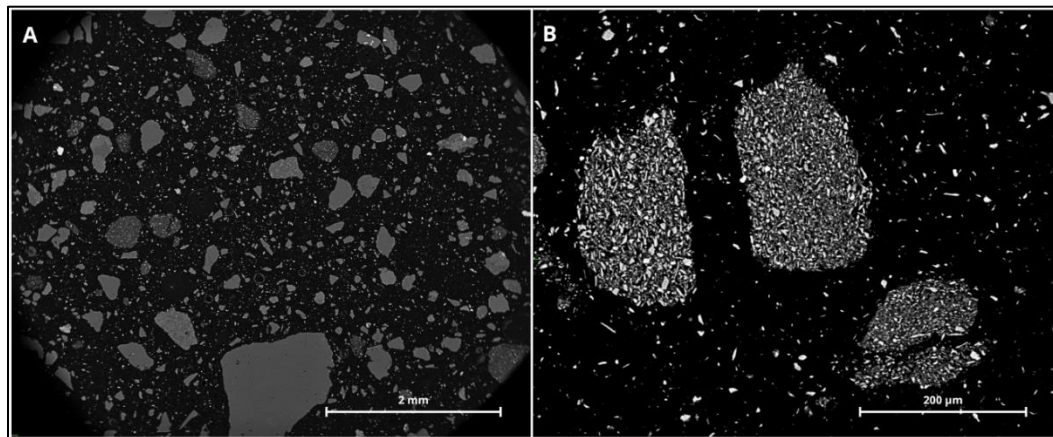


Figura 22. Imágenes QEMSCAN de muestras del relave DMH. A. muestra relave DMH, donde se observa una distribución más dispersa de las partículas. B. muestra DMH-SPLP, con aglomerados silicatados.

4.1.4. Resultados de composición elemental en muestras originales (ICP-OES y FAAS)

La composición elemental total de las cinco muestras originales fue determinada mediante las técnicas de ICP-OES y FAAS, a partir de datos obtenidos de Villegas (2025). Mediante ICP-OES se cuantificaron diez elementos principales en cada muestra (Tabla 8).

Tabla 8. Cuantificación de elementos totales en muestras originales mediante ICP-OES. Los elementos mayoritarios se expresan en porcentaje (%) y los elementos traza en miligramos por kilogramo (mg/kg). Modificado de Villegas (2025).

<i>Analito (unidad)</i>	<i>Talcuna</i>	<i>Goethita</i>	<i>Jarosita</i>	<i>Escondida</i>	<i>DMH</i>
%					
<i>Al</i>	2,42	$8,10 \times 10^{-5}$	0,16	$1,86 \times 10^{-3}$	2,51
<i>Ca</i>	1,28	0,71	3,03	0,13	0,10
<i>Fe</i>	5,63	10,25	16,49	2,96	1,78
<i>Na</i>	1,93	0,40	0,07	0,74	0,13
<i>Si</i>	29,05	28,97	28,14	29,75	2,89
mg/kg					
<i>Cu</i>	1.264	3.163	909	2.037	2.275
<i>Mg</i>	311	95,0	99,0	209	33,0
<i>Mn</i>	181	790	514	403	2.400
<i>Ni</i>	46,1	20,7	41,8	55,5	44,5
<i>S</i>	709	2.089	7.065	1.813	509

Sin embargo, en el caso de algunos elementos traza como, cadmio (Cd), cobalto (Co), plomo (Pb) y zinc (Zn), se presentaron interferencias espectrales atribuibles a concentraciones de Cu, Fe y Ni, lo que afectó su detección mediante ICP-OES. Para estos casos, se empleó la técnica FAAS, cuyos resultados se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Cuantificación de elementos totales en muestras originales mediante FAAS. Modificado de Villegas (2025).

<i>Analito (mg/kg)</i>	<i>Talcuna</i>	<i>Goethita</i>	<i>Jarosita</i>	<i>Escondida</i>	<i>DMH</i>
<i>Cd</i>	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado
<i>Co</i>	No Detectado	79,32	424,25	No Detectado	No Detectado
<i>Pb</i>	No Detectado	1.178,21	No Detectado	No Detectado	220,61
<i>Zn</i>	No Detectado	817,11	No Detectado	136,02	583,38
<i>Cu</i>	1.263,78	3.162,58	908,80	2.037,12	2.275,33
<i>Fe</i>	515,63	102.486,07	20,77	29.569,70	17.843,72

El cadmio no fue detectado en ninguna muestra debido a interferencias con níquel. El cobalto fue identificado en los relaves Goethita y Jarosita, mientras que el plomo se detectó en Goethita y DMH. Por su parte, el zinc se registró en los relaves Goethita, Escondida y DMH.

4.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Los resultados de los ensayos químicos fueron obtenidos a partir del trabajo realizado por el químico analista Gonzalo Villegas (Villegas, 2025), quien analizó las cinco muestras originales: Relave Talcuna, Goethita, Jarosita, Escondida y DMH.

4.2.1 Resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta

Las mediciones promedio de pH y conductividad eléctrica (CE) permiten evaluar el potencial de generación de drenaje ácido de mina (AMD) y estimar la salinidad del sistema, según los criterios establecidos en el apartado 3.3.1.

El relave Talcuna presentó el valor de pH más alto (8,51) y la mayor conductividad eléctrica (34,0 $\mu\text{S/cm}$), lo que indica un entorno ligeramente básico y con baja probabilidad de generar AMD. Asimismo, los relaves DMH, Goethita y Escondida presentaron condiciones neutro-básicas, por lo que se clasifican como no generadores de AMD, según los criterios establecidos en la metodología.

En contraste, la muestra Jarosita presentó el pH más bajo (2,92) y la menor conductividad (2,10 $\mu\text{S/cm}$), lo cual sugiere un ambiente ácido con alta probabilidad de generación de AMD. Los valores promedio se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta promedio de las muestras.
Modificado de Villegas (2025).

<i>Muestra</i>	<i>pH</i>	<i>CE ($\mu\text{S/cm}$)</i>
<i>Relave Talcuna promedio</i>	8,51	34,0
<i>Relave Goethita promedio</i>	7,99	25,6
<i>Relave Jarosita promedio</i>	2,92	2,10
<i>Relave Escondida promedio</i>	7,90	4,80
<i>Relave DMH promedio</i>	8,18	5,10

4.2.2 Resultados de prueba ABA modificado

La prueba ABA modificado (Tabla 11) permitió evaluar el potencial de generación de drenaje ácido mediante la relación entre el potencial de neutralización (NP) y el potencial acidificante (AP), expresada como índice NPR.

La muestra Jarosita fue clasificada como generadora de AMD, con un NPR de 0,45 y un valor negativo de NNP (-9,27 kg CaCO₃/t), lo que indica un exceso de acidez. Goethita presentó un NPR de 1,70, ubicándose en la zona de clasificación marginal. En contraste, Talcuna (NPR = 66,6) y DMH (NPR = 2,54) fueron consideradas no generadoras, dado su alto potencial de neutralización respecto a la acidez.

La muestra Escondida no pudo ser clasificada, ya que el pH se mantuvo por debajo de 1,50, lo que impidió la realización de la prueba y el cálculo del NP. Sin embargo, destaca por su elevado contenido de azufre como sulfuro (1,42 %), lo que podría indicar un riesgo potencial si no existe una capacidad neutralizante suficiente.

Tabla 11. Resultados finales de la prueba ABA modificado. Modificado de Villegas (2025).

<i>Material</i>	<i>NP</i> (kg CaCO ₃ eq/t)	<i>AP</i> (kg CaCO ₃ eq/t)	<i>NNP</i> (kg CaCO ₃ eq/t)	<i>NPR</i>	<i>Clasificación</i>	<i>%Sulfuro en relave</i>
<i>Talcuna</i>	113	1,69	111	66,6	No generador de AMD	0,050 %
<i>Goethita</i>	33,7	19,8	13,9	1,70	Material marginal	0,63 %
<i>Jarosita</i>	7,66	16,9	-9,27	0,45	Generador de AMD	0,54 %
<i>Escondida</i>	N/A	44,2	N/A	N/A	N/A	1,42 %
<i>DMH</i>	13,6	5,34	8,24	2,54	No generador de AMD	0,17 %

4.2.3 Resultados de prueba NP-Sobek

La prueba de potencial de neutralización a granel (NP-Sobek), descrito en el apartado 3.3.3, incluyó una prueba preliminar de efervescencia con HCl para estimar la reactividad inicial de cada relave. Los resultados se resumen en la Tabla 12. Talcuna presentó una efervescencia moderada; Goethita y Escondida, una reacción leve; mientras que Jarosita y DMH no mostraron reacción visible.

En cuanto a la capacidad neutralizante, Talcuna registró el valor más alto (127 kg CaCO₃ eq/t), seguido de Goethita (39,0) y DMH (17,3). Por el contrario, Escondida y Jarosita presentaron los valores más bajos (10,4 y 6,03 kg CaCO₃ eq/t, respectivamente), lo que indica una capacidad limitada para contrarrestar la acidez potencial.

Tabla 12. Potencial de Neutralización (NP) promedio de cada relave obtenido en la prueba NP-Sobek. Modificado de Villegas (2025).

<i>Material</i>	<i>Efervescencia</i>	<i>NP promedio</i> (kg CaCO ₃ eq/t)
<i>Talcuna</i>	Moderada	127
<i>Goethita</i>	Baja	39,0
<i>Jarosita</i>	Ninguna	6,03
<i>Escondida</i>	Baja	10,4
<i>DMH</i>	Ninguna	17,3

4.2.4 Resultados de prueba ABCC

La prueba ABCC permitió evaluar la capacidad de neutralización efectiva de los relaves a través del seguimiento continuo del pH durante la adición de ácido. Los valores de NP-Sobek, NP efectivo a pH 4, porcentaje de neutralización efectiva (%RN) y pH final alcanzado.

Talcuna presentó la mayor capacidad neutralizante, tanto en términos absolutos (NP ABCC = 77,9 kg CaCO₃ eq/t) como relativos (%RN = 61,6 %). Goethita también mostró un alto rendimiento neutralizante (%RN = 85,4 %), mientras que DMH y Escondida evidenciaron una respuesta intermedia (Tabla 13). Por su parte, Jarosita presentó un %RN anómalo (217 %), superior al 100 %, lo que sugiere sobreestimación o interferencias durante la titulación, como se refleja en la forma irregular de su curva (Figura 23).

La Figura 23 muestra la curva ABCC del relave Talcuna, donde se observa una transición progresiva del pH conforme aumenta el potencial de neutralización, lo que refleja una alta capacidad neutralizante sostenida en un amplio rango. Este comportamiento contrasta con el observado en el relave Jarosita, cuya curva presenta un descenso abrupto del pH y un %RN anómalo (217 %), lo que sugiere un resultado no confiable. Las curvas correspondientes a los demás relaves se encuentran en el Anexo 3, Figuras 1 a 3.

Tabla 13. Resultados de la prueba ABCC. Modificado de Villegas (2025).

<i>Material</i>	<i>NP Sobek</i> (kg CaCO ₃ eq/t)	<i>NP ABCC</i> <i>pH 4</i> (kg CaCO ₃ eq/t)	<i>pH</i> <i>final</i>	<i>%RN</i>	<i>Observaciones sobre la capacidad neutralizadora</i>
<i>Talcuna</i>	127	77,9	2,50	61,6 %	Alta capacidad neutralizadora
<i>Goethita</i>	39,0	33,3	2,50	85,4 %	Alta capacidad neutralizadora
<i>Jarosita</i>	6,03	13,0	2,80	217 %	Baja capacidad neutralizadora
<i>Escondida</i>	10,4	5,42	2,80	52,2 %	Baja capacidad neutralizadora
<i>DMH</i>	17,3	9,36	2,70	54,3 %	Moderada capacidad neutralizadora

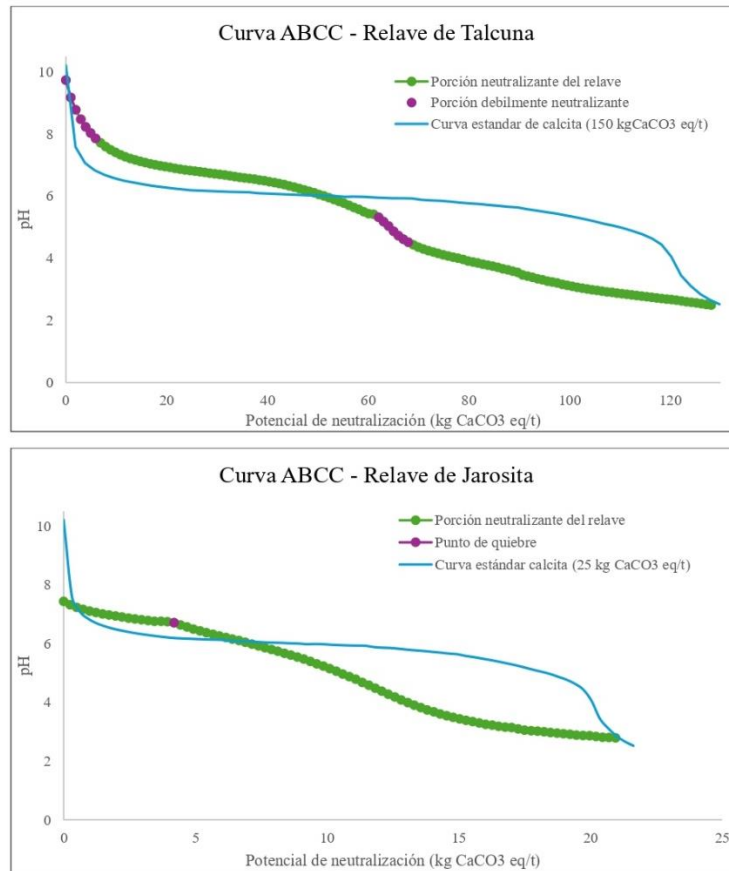


Figura 23. Curvas de amortiguación de la prueba ABCC. A. Curva relave Talcuna. B. Curva relave Jarosita. Modificado de Villegas (2025).

4.2.5 Resultados de prueba SPLP

La prueba SPLP permitió estimar la movilidad de elementos inorgánicos bajo condiciones de lixiviación simulada, a partir del análisis de cinco muestras de relave y una muestra en blanco (CMP). Los valores de pH obtenidos fueron en general neutros a ligeramente alcalinos, destacando Talcuna con el pH más alto (8,64) y Jarosita con el más bajo (7,57). En contraste, el blanco presentó un pH ácido (4,99) (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados de la prueba SPLP. pH promedio y concentraciones principales de analitos inorgánicos movilizados en la prueba SPLP. Modificado de Villegas (2025).

<i>Analito</i>	<i>CMP</i> (mg/L)	<i>Talcuna</i>	<i>Goethita</i>	<i>Jarosita</i>	<i>Escondida</i>	<i>DMH</i>
<i>pH promedio</i>	4,99	8,64	7,68	7,57	7,60	8,45
<i>Ag (mg/kg)</i>	5,00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Al (mg/kg)</i>	N/A	7,57	0,810	0,660	18,6	67,9
<i>As (mg/kg)</i>	5,00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Ca (mg/kg)</i>	N/A	$1,87 \times 10^3$	$6,39 \times 10^3$	$1,39 \times 10^4$	464	350
<i>Cd (mg/kg)</i>	1,00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Co (mg/kg)</i>	N/A	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Cr (mg/kg)</i>	5,00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Cu (mg/kg)</i>	N/A	0,0300	0,740	0,220	0,780	0,500
<i>Fe (mg/kg)</i>	N/A	2,39	2,15	4,70	2,38	5,88
<i>Hg (mg/kg)</i>	0,20	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Mg (mg/kg)</i>	N/A	278	221	221	57,2	42,1
<i>Ni (mg/kg)</i>	N/A	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>Pb (mg/kg)</i>	5,00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
<i>S (mg/kg)</i>	N/A	$3,62 \times 10^3$	$6,85 \times 10^3$	$1,24 \times 10^4$	334	227
<i>Zn (mg/kg)</i>	N/A	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

En cuanto a los elementos movilizados, los mayores aportes correspondieron a calcio (Ca) y azufre (S), con especial relevancia en Jarosita, donde se alcanzaron concentraciones de $1,39 \times 10^4$ mg/kg de Ca y $1,24 \times 10^4$ mg/kg de S. Le siguieron en magnitud los relaves Goethita y Talcuna. También se detectaron aluminio (Al), hierro (Fe) y magnesio (Mg), destacando las mayores concentraciones de Al en DMH (67,9 mg/kg) y de Mg en Talcuna (278 mg/kg). El cobre (Cu) fue detectado en concentraciones traza, con el valor más alto en Escondida (0,780 mg/kg).

Por otro lado, elementos considerados contaminantes como arsénico (As), cobalto (Co), níquel (Ni), plomo (Pb), plata (Ag) y zinc (Zn) no fueron detectados mediante ICP-OES ni FAAS, posiblemente debido a concentraciones bajo el límite de detección.

5. DISCUSIÓN

5.1 INTEGRACIÓN EFECTIVA DE TÉCNICAS MINERALÓGICAS Y QUÍMICAS

La predicción del drenaje ácido de mina (AMD) requiere combinar técnicas químicas y mineralógicas, ya que ninguna entrega por sí sola una visión completa del comportamiento de los relaves. Las primeras proporcionan indicadores rápidos sobre acidez potencial y neutralización, pero no consideran aspectos como textura, mineralogía activa ni liberación; las segundas caracterizan fases específicas y su modo de ocurrencia, aunque no evalúan directamente la generación de acidez ni la movilidad de elementos.

Integrar ambos enfoques reduce incertidumbre, resuelve contradicciones entre métodos y mejora la confiabilidad del diagnóstico ambiental. Esta interacción se muestra en la Figura 24, donde se esquematiza su integración para la predicción del AMD. No obstante, su aplicación debe evaluarse según la mineralogía del relave, la calidad de los datos y el objetivo del análisis. Las secciones siguientes abordan esta evaluación comparativa y proponen una secuencia metodológica optimizada para diferentes contextos.

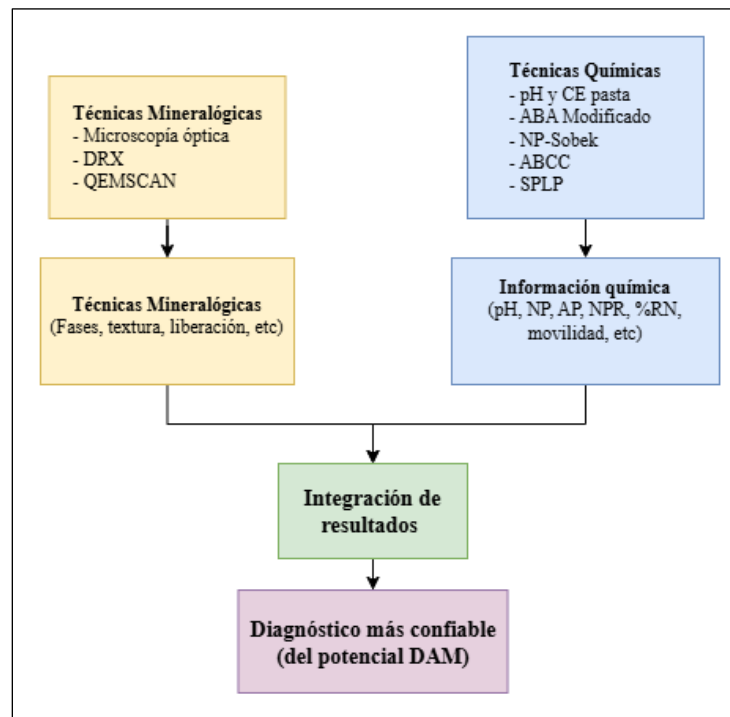


Figura 24. Esquema de integración de técnicas mineralógicas y químicas para el diagnóstico del potencial AMD.

5.2 EVALUACIÓN CRÍTICA DE TÉCNICAS APLICADAS

5.2.1 Técnicas de caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica fue fundamental para identificar las fases responsables de la generación o neutralización de AMD. Se emplearon técnicas complementarias como microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX) y análisis automatizado por QEMSCAN®, cuya integración permitió interpretar mejor la textura, liberación mineral y composición de los relaves.

La microscopía óptica facilitó la observación de minerales reactivos y su asociación con otras fases. En Talcuna y Goethita se identificó calcita diseminada, coherente con su comportamiento neutralizante. En Escondida y DMH, la pirita presentó morfología fragmentada, lo que sugiere mayor susceptibilidad a oxidación. También se observaron agregados de oxidados de hierro asociados a minerales opacos (pirita, magnetita, hematita) en muestras postratamiento, junto con una reducción de granulometría que podría favorecer la liberación de metales.

El análisis por DRX permitió estimar la abundancia relativa de fases cristalinas presentes en los relaves. Sin embargo, presentó limitaciones en la detección de fases amorfas o escasamente cristalinas, como ciertos óxidos de hierro y aluminio (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Esto se evidenció en muestras como Jarosita y Goethita postratamiento, donde subestimó la presencia de agregados férricos claramente observados mediante microscopía óptica. Esta limitación justifica su complementación con técnicas como ICP-OES o QEMSCAN®.

Por su parte, QEMSCAN® permitió obtener información detallada sobre la composición mineral y el grado de liberación de los sulfuros, siendo particularmente útil en muestras como Escondida, donde la pirita se encontraba altamente liberada (>90 %) pese a que los ensayos químicos no reflejaron adecuadamente su potencial neutralizante. Su precisión, sin embargo, depende de la calidad de la biblioteca mineral utilizada, construida a partir de espectros EDS representativos (Fandrich *et al.*, 2007). Además, presenta limitaciones para distinguir entre óxidos de hierro como hematita, magnetita y limonita, lo que puede restringir la interpretación geoquímica de estas fases. Un patrón recurrente identificado con QEMSCAN® fue la disminución del tamaño de grano en las muestras postratamiento, lo que podría favorecer la reactividad superficial de los minerales. Esta tendencia, observada principalmente en Talcuna, Goethita y Escondida, podría incidir en la

movilidad de elementos y en la eficacia neutralizante de ciertas fases. La Tabla 15 resume los principales aportes, limitaciones y ejemplos clave de cada técnica aplicada en este estudio.

Tabla 15. Comparación de técnicas de caracterización mineralógica.

<i>Técnica</i>	<i>Ventajas principales</i>	<i>Limitaciones</i>	<i>Ejemplo clave en este estudio</i>
<i>Microscopía óptica</i>	Observa textura y asociación	Subjetiva, limitada a fases opacas/transmitidas	Pirita fragmentada (DMH, Escondida)
<i>DRX</i>	Identifica fases cristalinas	No detecta amorfos o poco cristalinos	Subestima óxidos en Jarosita, Goethita
<i>QEMSCAN®</i>	Cuantifica fases y liberación	Requiere base de datos detallada, limita amorfos	Pirita liberada >90 % en Escondida

5.2.2 Técnicas de caracterización química

Los ensayos químicos aplicados en este estudio fueron fundamentales para estimar el potencial acidificante y neutralizante de los relaves analizados. Estas técnicas entregan indicadores cuantitativos rápidos y operativamente accesibles, por lo que se emplean ampliamente como herramientas de evaluación inicial del AMD.

La prueba ABA modificado, junto con el ensayo NP-Sobek, permitió una primera clasificación química. En Talcuna, ambos ensayos coincidieron en indicar un alto potencial neutralizante (NPR = 66,6; NP-Sobek = 127), coherente con su pH básico (8,51) y la presencia abundante de calcita. En Goethita, el ABA lo clasificó como marginal (NPR = 1,70), mientras que el ABCC mostró un rendimiento neutralizante elevado (%RN = 85,4) y el pH fue neutro-básico (7,99). Esta discrepancia puede atribuirse a que la prueba ABA tiende a subestimar el potencial acidificante (AP) en presencia de sulfuros ocluidos, o bien a sobreestimar el potencial neutralizante (NP) cuando existen silicatos que reaccionan parcialmente a pH extremos, generando una neutralización aparente (Villanueva, 2019). En estos casos, la aplicación complementaria del ensayo ABCC es particularmente adecuada, ya que utiliza curvas patrón de carbonato puro, permite una evaluación más precisa del comportamiento geoquímico real (Stewart *et al.*, 2006).

El relave Jarosita fue clasificado como generador de acidez (NPR = 0,45), en concordancia con su pH ácido en pasta (2,92). Sin embargo, el potencial acidificante obtenido mediante la prueba ABA

modificado (16,9 kg CaCO₃ eq/t) podría estar subestimado, considerando la proporción de sulfuros (3,89 % en QEMSCAN®) y la pirita parcialmente liberada. Una hipótesis es que la presencia de magnetita, observada mineralógicamente, haya contribuido a un aumento del pH, debido a su disolución consumiendo protones (H⁺), como indica la Ecuación 9 (Álvarez, 2015). Este proceso podría enmascarar la verdadera acidez del relave y afectar la interpretación química. Se resume en la Figura 25.

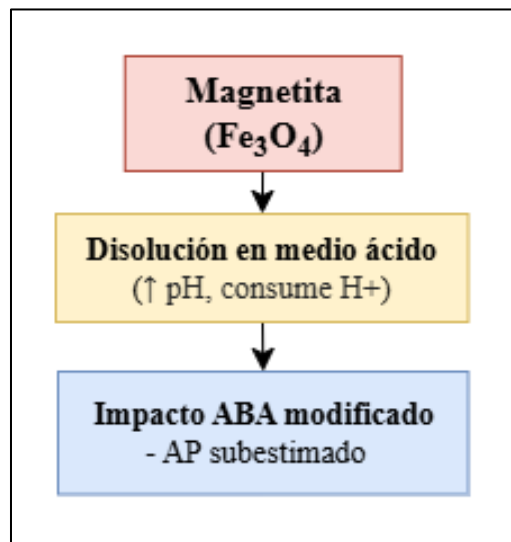
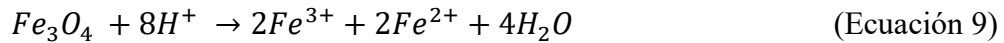


Figura 25. Disolución de magnetita y su posible efecto en la prueba ABA modificado.

La prueba ABCC, por su parte, arrojó un valor anómalo de %RN (217 %), explicable por el bajo NP total del material (6,03 kg CaCO₃ eq/t), inferior al umbral mínimo recomendado para aplicar este ensayo (< 10 kg/t) según Calderón *et al.* (2015). En tales casos, la curva de neutralización pierde validez, conduciendo a una sobreestimación del %RN. Asimismo, el ensayo SPLP entregó un pH neutro (7,57), en contradicción con el perfil ácido del relave, probablemente por neutralización temporal de sales solubles como jarosita o yeso, o por efectos de dilución propios del ensayo, que no reproducen fielmente las condiciones químicas reales (SERNAGEOMIN, 2015).

En el caso de Escondida, no fue posible determinar el NP mediante ABA, ya que el pH se mantuvo por debajo de 1,50 incluso con la adición de ácido diluido, lo que impidió completar la prueba. Esta

respuesta se relaciona con la ausencia de carbonatos, reflejando una capacidad neutralizante insignificante. En estos casos, se recomienda emplear técnicas alternativas como el NP-Sobek, que sí arrojó resultados, destacando la importancia de una caracterización mineralógica previa para seleccionar el método químico más apropiado.

En el relave DMH, los ensayos químicos lo clasificaron correctamente como no generador de AMD, con bajo contenido de sulfuros (0,17 %), pH alcalino (8,18) y una reactividad neutralizante limitada pero suficiente (NP-Sobek = 17,3; %RN intermedio en ABCC). Sin embargo, la presencia de piritita fragmentada y la movilidad de aluminio detectada en ICP-OES y SPLP sugieren que, bajo condiciones más agresivas, podrían desarrollarse procesos de generación de acidez o liberación de metales, por lo que se recomienda monitoreo a largo plazo. Una síntesis comparativa de los principales resultados químicos por muestra se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Resumen de parámetros químicos aplicados a las muestras de relave analizadas.
Modificado de Villegas (2025).

<i>Técnica / Relave</i>	<i>Relave Talcuna</i>	<i>Relave Goethita</i>	<i>Relave Jarosita</i>	<i>Relave Escondida</i>	<i>Relave DMH</i>
<i>pH en pasta</i>	8,51	7,99	2,92	7,90	8,18
<i>pH de SPLP</i>	8,64	7,68	7,57	7,60	8,45
<i>Clasificación ABA modificado</i>	NPAG	Material Marginal	PAG	N/A	Material Marginal
<i>Clasificación NP-Sobek</i>	NPAG	Material Marginal	PAG	PAG	NPAG
<i>% RN</i>	61,6	85,4	N/A	52,2	54,3
<i>Sustancias tóxicas</i>	No detectadas	No detectadas	No detectadas	No detectadas	No detectadas

5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO Y APLICABILIDAD DE TÉCNICAS

La evaluación comparativa permitió establecer el nivel de recomendación de cada técnica analítica aplicada en función del tipo de relave. Todas las técnicas fueron implementadas en cada muestra, sin embargo, su aplicabilidad varió según la mineralogía, química o respuestas experimentales observadas.

La Tabla 17 resume el nivel de recomendación de cada técnica analítica según el tipo de relave, considerando su aplicabilidad y efectividad observada durante este estudio.

Tabla 17. Nivel de recomendación de técnicas analíticas aplicadas según tipo de relave.

<i>Técnica / Relave</i>	<i>Talcuna</i>	<i>Goethita</i>	<i>Jarosita</i>	<i>Escondida</i>	<i>DMH</i>
<i>Microscopía óptica</i>	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
<i>DRX</i>	Recomendada	Limitada	Limitada	Recomendada	Recomendada
<i>QEMSCAN®</i>	No recomendada	No recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
<i>pH y CE en pasta</i>	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
<i>ABA modificado</i>	Recomendada	Recomendada	Limitada	No válida	Recomendada
<i>NP-Sobek</i>	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
<i>ABCC</i>	Recomendada	Recomendada	No válida	Recomendada	Recomendada
<i>SPLP</i>	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada

Nota: La categoría “limitada” implica que la técnica fue aplicada, pero presentó restricciones significativas. “No válida” indica que el resultado obtenido no fue confiable o interpretable.

5.3.1 Microscopía óptica

Esta técnica es clave para evaluar el modo de ocurrencia, textura y grado de liberación de minerales potencialmente reactivos, como pirita o calcita. Su principal ventaja es la capacidad de identificar asociaciones texturales que influyen directamente en la reactividad del material, información que no puede ser obtenida mediante ensayos químicos. Sin embargo, su aplicación se limita a minerales visibles bajo luz transmitida o reflejada, y requiere experiencia en interpretación petrográfica. Además, permite identificar fases minerales demasiado escasas o con bajo grado de cristalinidad que pueden pasar desapercibidas en técnicas como DRX (Petruk, 2000). En este estudio, fue útil en todas las muestras, destacando el caso de Escondida, donde se observó pirita con morfología fragmentada y bordes angulosos, indicativos de mayor susceptibilidad a la oxidación.

5.3.2 Difracción de rayos X (DRX)

Permite estimar semicuantitativamente la abundancia relativa de fases cristalinas, aunque sus resultados no reflejan directamente la proporción másica del conjunto mineral, ya que no considera adecuadamente algunos minerales menores o accesorios (Martínez, 2018). Su principal ventaja es la identificación rápida de minerales bien cristalizados; sin embargo, presenta limitaciones frente a

fases amorfas o poco cristalinas, como ciertos óxidos de hierro y aluminio (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). En este estudio, fue eficaz en Talcuna, Escondida y DMH, pero resultó insuficiente en Jarosita y Goethita postratamiento, ya que, si bien logró detectar algunos minerales correspondientes a agregados de oxidados de hierro, su presencia no fue representativa en comparación con lo observado mediante microscopía óptica y análisis QEMSCAN®. Se recomienda su aplicación como herramienta preliminar para obtener una visión global de la muestra, complementando posteriormente con técnicas de mayor resolución.

5.3.3 QEMSCAN®

Proporciona información detallada sobre composición mineral, asociación de fases y grado de liberación. Aunque su alto costo limita su uso extensivo, es especialmente útil para corroborar datos de DRX y microscopía (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015; Petruk, 2000). En este estudio, fue clave en las muestras Escondida y Jarosita, al permitir cuantificar la liberación de pirita. Sin embargo, no se recomienda su aplicación en Talcuna y Goethita, donde las técnicas de microscopía óptica y DRX resultaron suficientes para caracterizar adecuadamente el material. Su principal limitación es la incapacidad para diferenciar los minerales de aglomerados de oxidados de hierro.

5.3.4 pH y CE en pasta

Es una prueba preliminar recomendada por su bajo costo, rapidez y facilidad de aplicación. Permite una clasificación inicial del comportamiento químico del relave, aunque solo refleja condiciones actuales del material (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). En Escondida, por ejemplo, el pH neutro-básico contrastó con el NP-Sobek, que lo clasificó como generador de acidez, evidenciando la necesidad de técnicas complementarias.

5.3.5 Prueba ABA modificado

Se recomienda su uso cuando se detecta una presencia suficiente de carbonatos en la mineralogía. En Jarosita (0,10 % de carbonatos según QEMSCAN®), el ensayo fue aplicable; en cambio, en Escondida (0,01 %), no se alcanzó el pH mínimo requerido, por lo que la prueba no fue válida. Esto evidencia que la prueba ABA no es adecuada en materiales con capacidad neutralizante muy baja o nula. Además, en Jarosita se observó una posible subestimación del potencial acidificante (AP), lo

que sugiere que este ensayo puede presentar ciertas limitaciones en contextos mineralógicos complejos.

5.3.6 Prueba NP-Sobek

Es útil cuando la prueba ABA entrega resultados ambiguos o la clasificación es marginal. Estima el NP incluso en materiales con baja reactividad alcalina, aunque incorpora subjetividad en la evaluación visual de efervescencia (White *et al.*, 1999 en Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). A pesar de ello, es ampliamente utilizado en EE. UU. bajo la norma EPA-600 (Morin & Hutt, 2009), mientras que, en Chile, el protocolo más utilizado corresponde al ABA modificado (SERNAGEOMIN, 2015).

5.3.7 Prueba ABCC

Este ensayo estima la capacidad neutralizante efectiva mediante titulación continua. Es útil cuando ABA o NP-Sobek generan dudas, pero su aplicación es más lenta, requiere interpretación gráfica y pierde validez con NP totales bajos ($<10 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$), como ocurrió en Jarosita. Aunque no es indispensable, aporta valor en contextos específicos.

5.3.8 Composición química total y prueba SPLP

La composición elemental se determinó mediante ICP-OES y FAAS, mientras que la prueba SPLP se empleó para estimar la movilidad de metales en condiciones de lixiviación ácida. Aunque permitió identificar elementos potencialmente tóxicos, no se observó liberación efectiva en ninguna muestra. El SPLP puede usarse como herramienta de detección preliminar, pero su valor predictivo es limitado, ya que proporciona solo una visión instantánea (SERNAGEOMIN, 2015) y su utilidad como criterio de clasificación es restringida (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015).

5.4 PROTOCOLO DE PREDICCIÓN PROPUESTO

A partir de las técnicas mineralógicas (Microscopia óptica, DRX y QEMSCAN) y las técnicas químicas (pH y CE en pasta, ABA modificado, NP-Sobek, ABCC y SPLP), se propone un protocolo integrado para evaluar el potencial de generación de drenaje ácido en pasivos mineros principalmente en relaves mineros. Este protocolo busca optimizar la predicción del comportamiento acidogénico mediante la complementariedad entre análisis químicos tradicionales

y herramientas mineralógicas avanzadas. El protocolo propuesto se organiza en cuatro etapas principales.

En la Etapa I se realiza la caracterización mineralógica del relave mediante técnicas como microscopía óptica y difracción de rayos X (DRX). El uso de QEMSCAN® se considera opcional debido a su alto costo y disponibilidad limitada, aunque se recomienda su aplicación en muestras puntuales para corroborar y ampliar la información obtenida con otras metodologías. Esta etapa permite identificar la presencia de sulfuros, carbonatos y otras fases mineralógicas relevantes, las cuales influyen directamente en el comportamiento geoquímico del material.

La Etapa II corresponde a la aplicación de ensayos químicos convencionales. El flujo metodológico se inicia con la selección del ensayo ABA modificado o NP-Sobek, dependiendo de la presencia o ausencia de carbonatos identificada durante la etapa mineralógica. Posteriormente, se sugiere la medición del pH y la conductividad eléctrica (CE) en pasta como un ensayo complementario de rápida ejecución, que puede realizarse de forma simultánea a los análisis anteriores. De manera opcional, se puede aplicar el ensayo ABCC, en caso de que el valor de NP supere los 10 kg CaCO₃/t, ya que permite estimar de forma más realista la capacidad neutralizante efectiva del material. Asimismo, si el estudio contempla un enfoque ambiental, se recomienda incluir el ensayo SPLP, con el fin de evaluar la movilidad de elementos potencialmente tóxicos bajo condiciones de lixiviación simulada.

En la Etapa III, se integran e interpretan los resultados mineralógicos y químicos obtenidos, permitiendo establecer relaciones entre la composición del material, su potencial acidificante y la respuesta a procesos de oxidación y neutralización.

Finalmente, la Etapa IV contempla la clasificación del material según su comportamiento frente al drenaje ácido, considerando los valores de NNP, la mineralogía identificada y los resultados complementarios de lixiviación. Esta etapa final constituye un insumo clave para la gestión ambiental de pasivos mineros y la toma de decisiones preventivas. En la Figura 26 se presenta un diagrama de flujo que resume el protocolo propuesto, desde la caracterización inicial hasta la clasificación del material según su potencial de generación de drenaje ácido minero.

Si bien el protocolo propuesto integra eficazmente herramientas químicas y mineralógicas, se reconoce como limitación la ausencia de ensayos cinéticos, los cuales permitirían evaluar la generación de acidez bajo condiciones controladas a largo plazo. Pruebas como celdas de humedad o test de columnas podrían complementar la caracterización estática, aportando información sobre la tasa de liberación de metales y acidez en condiciones más cercanas al campo.

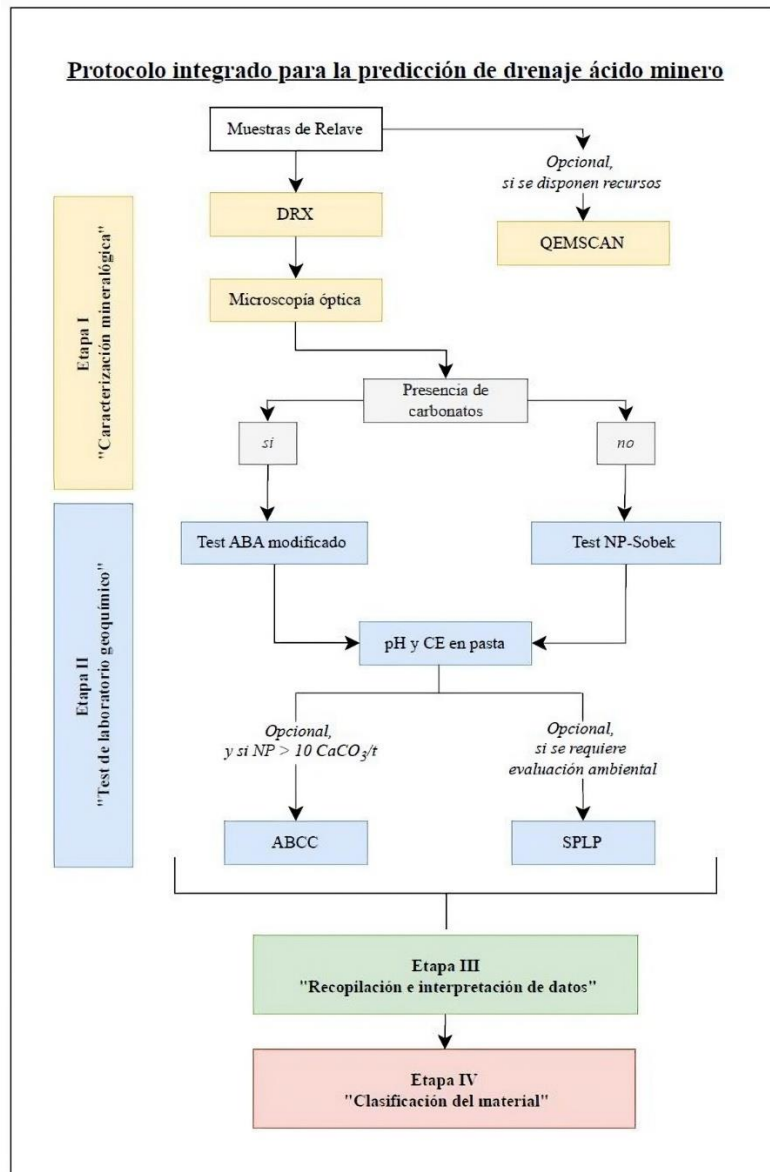


Figura 26. Protocolo integrado propuesto para la predicción del drenaje ácido minero (AMD).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mostraron diferencias marcadas entre los relaves analizados en cuanto a su potencial acidificante y capacidad neutralizante. Estas diferencias se explican por la composición mineralógica, el modo de ocurrencia de los sulfuros, y la presencia o ausencia de fases con capacidad neutralizante. Por ejemplo, la pirita fue el principal mineral generador de acidez, pero su comportamiento varió según si estaba libre u ocluida, mientras que la efectividad de los carbonatos dependió de su abundancia, distribución y reactividad. Estas variaciones confirman que no existe un enfoque único aplicable a todos los relaves, y que es necesario adaptar las técnicas según las características específicas de cada depósito.

En este contexto, contar con un protocolo flexible y secuencial resulta fundamental para guiar la caracterización de relaves en distintos escenarios. La integración de técnicas químicas y mineralógicas permite interpretar de forma más precisa el comportamiento potencial del material frente al AMD, especialmente en contextos donde la información inicial es limitada o poco representativa. El protocolo propuesto en este trabajo entrega criterios para combinar ensayos químicos accesibles con herramientas mineralógicas más específicas, permitiendo ajustar la profundidad del análisis según los resultados preliminares y la complejidad del material. Este enfoque facilita la priorización de relaves según su riesgo y orienta la toma de decisiones en proyectos de remediación, cierre o monitoreo ambiental.

Como proyección, se considera necesario complementar este protocolo con un reconocimiento previo en terreno, lo que permitiría evaluar directamente las condiciones ambientales del sitio, identificar evidencias visuales de alteración y orientar mejor el muestreo. Además, se recomienda incorporar pruebas cinéticas en futuras aplicaciones, tales como test de columnas y celdas de humedad, que permitan evaluar el comportamiento real del material a largo plazo bajo condiciones simuladas más representativas. Esta información ayudaría a anticipar tasas de generación de acidez, liberación de metales y duración del proceso, fortaleciendo la capacidad predictiva del protocolo y aportando a una gestión ambiental más robusta de los pasivos mineros.

8. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, C.** 2015. Diseño de planta de lixiviación en pila para la unidad de procesos hidrometalúrgicos. Codelco, División Teniente. Proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: 124 pp. Valparaíso.
- AMIRA INTERNATIONAL LIMITED.** 2002. ARD Test Handbook. Ian Wark Research Institute & Environmental Geochemistry International Pty Ltd.: Proyecto P387A. Melbourne.
- ASTA, M.P.; SALAZAR, P.; SANZ, L.F.; SERRANO, M.J. & JIMÉNEZ, J.B.** 2011. Procesos geoquímicos en aguas ácidas por meteorización de sulfuros. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. **122** (2): 259-272.
- ARANGO, M. & OLAYA, Y.** 2012. Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Gestión y Ambiente*, Vol. **15** (3): 125-133. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169424893009> (acceso abril 2025).
- BOUZAHZAH, H.; BENZAAZOUA, M.; PLANTE, B. & BUSSIÈRE, B.** 2015. A quantitative approach for the estimation of the “fizz rating” parameter in the acid-base accounting tests: A new adaptation of the Sobek test. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. **153**: 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.03.003> (acceso abril, 2025).
- CALDERÓN, C.A.** 2001. Diseño de un proceso de descontaminación de un agua residual de mina, incluyendo la remoción y recuperación de iones metálicos a través del proceso de extracción por solventes en reactores de membranas líquidas. Seminario de Título para optar al Título de Químico Ambiental. Universidad de Chile: 99 pp. Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188417> (acceso julio 2025).
- CALDERÓN, C.A.; FARFÁN, N. & SOTO, C.** 2015. Applicability of a New and More Efficient Approach to the ABCC Test. Informe técnico. Fundación Chile (Inédito): 11 pp. Santiago.
- CHANDRA, A.P. & GERSON, A.R.** 2010. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective. *Surface Science Reports*, Vol. **65** (9): 293-315. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2010.08.003>
- CHAPARRO, L.T.** 2015. Drenajes ácidos de mina: formación y manejo. *Revista ESAICA*, Vol. **1** (1): 53-57.
- CHOTPANTARAT, S.** 2011. A review of static tests and recent studies. *American Journal of Applied Sciences*, Vol. **8** (4): 400-406. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2011.400.406> (acceso mayo 2025).
- COMISIÓN CHILENA DEL COBRE.** 2024a. Análisis de la industria mundial de fundiciones. Gobierno de Chile. <https://www.cochilco.cl> (acceso abril 2025).

- COMISIÓN CHILENA DEL COBRE.** 2024b. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales: 2004-2023 (43ª ed.). Gobierno de Chile. <https://www.cochilco.cl> (acceso abril 2025).
- DOLD, B.** 2003. Aguas ácidas de mina: Origen, diagnóstico y alternativas de remediación. *Revista Minería Chilena*, Vol. **309**: 42-53.
- DOLD, B.** 2017. Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. **172**: 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014> (acceso mayo 2025).
- ELGHALI, A.; BENZAAZOUA, M.; TAHA, Y.; AMAR, H.; AIT-KHOUIA, Y.; BOUZAHZAH, H. & HAKKOU, R.** 2023. Prediction of acid mine drainage: Where we are. *Earth-Science Reviews*, Vol. **241**: 104421. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104421> (acceso mayo 2025).
- FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D. & MOELLER, K.** 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. **84**: 310-320. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301751606001621> (acceso junio 2025).
- GODFRID, J.; POO CIFUENTES, P.; PALMISANO, T. & FUENTES PEREIRA, C.** 2024. Pasivos ambientales mineros en Chile: insumos y propuestas para una gestión sostenible. Ediciones Universidad Autónoma de Chile: 66 pp. Santiago. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/246052> (acceso julio 2025).
- JAMBOR, J.L.; DUTRIZAC, J.E.; GROAT, L.A. & RAUDSEPP, M.** 2002. Static tests of neutralization potentials of silicate and aluminosilicate minerals. *Environmental Geology*, Vol. **43** (1): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0615-y> (acceso mayo 2025).
- KUBOTA, D.A.** 2024. Chile y la ausencia de una política de educación en minería. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas. Universidad de Chile: 57 pp. Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200496> (acceso abril 2025).
- MARTÍNEZ, P.** 2018. Protocolo de caracterización para la predicción de drenaje ácido en depósitos de relaves mineros. Trabajo de Final de Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales. Universidad Internacional de Andalucía: 62 pp. Sevilla. <https://dspace.unia.es/handle/10334/3932> (acceso abril 2025).
- MATSUMOTO, S.; ISHIMATSU, H.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T. & KUSUMA, G.J.** 2018. Characterization of mine waste and acid mine drainage prediction by simple testing methods in terms of the effects of sulfate-sulfur and carbonate minerals. *Minerals*, Vol. **8** (9): 403. <https://doi.org/10.3390/min8090403> (acceso abril 2025).
- MEND.** 1991. Acid Rock Drainage Prediction Manual. MEND Project 1.16.1b. Natural Resources Canada, Mine Environment Neutral Drainage Program: 83 pp. Ottawa. <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.16.1b.pdf> (acceso mayo 2025).

- MEND.** 2009. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials (MEND Report 1.20.1). CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, Natural Resources Canada: 579 pp. Ottawa. https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.20.1_PredictionManual.pdf (acceso mayo 2025).
- MORIN, K.A. & HUTT, N.M.** 2009. On the Nonsense of Arguing the Superiority of an Analytical Method for Neutralization Potential. MDAG.com Internet Case Study. https://www.mdag.com/case_studies/cs32.html (acceso junio 2025).
- MOYO, A.; PARBHAKAR-FOX, A.; MEFFRE, S. & COOKE, D.R.** 2025. An accelerated kinetic leach test for geochemical and environmental characterisation of acid and metalliferous drainage. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. **38**: 104092. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104092> (acceso junio 2025).
- NORDSTROM, D.K.** 1982. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid Sulfate Weathering*. Soil Science Society of America: 37-56. Madison.
- OBLASSER, A.** 2016. Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 163. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): 103 pp. Santiago. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40475-estudio-lineamientos-incentivos-regulacion-manejo-pasivos-ambientales-mineros> (acceso abril 2025)
- PALMA, G.A.** 2018. Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: 114 pp. Arequipa.
- PARBHAKAR-FOX, A.K.; EDRAKI, M.; WALTERS, S. & BRADSHAW, D.R.** 2011. Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, Vol. **24** (12): 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.019> (acceso mayo 2025).
- PARBHAKAR-FOX, A. & LOTTERMOSER, B.G.** 2015. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, Vol. **82**: 107-124. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.015> (acceso mayo 2025).
- PETRUK, W.** 2000. Applied mineralogy to tailings and waste rock piles-sulfide oxidation reactions and remediation of acidic water drainage. Applied Mineralogy in the Mining Industry (Petruck, W. editor). Elsevier Science: 201-225. Amsterdam.
- SENESE, A.; NEGRELLI, M. & HIDALGO, N.** 2021. Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera. *Revista Colombiana de Materiales*, Vol. **18**: 3-20. <https://doi.org/10.17533/RCM/udea.rcm.n18a01> (acceso abril 2025).

- SANDOVAL-ZAMBRANO, G. & MONTES-ATENAS, G.** 2012. Errors in the estimation of size-by-liberation flotation rate constants. *Minerals Engineering*, Vol. **27-28**: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.11.004> (acceso abril 2025).
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.** 2007. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves (DSM/07/31). Departamento de Seguridad Minera, Servicio Nacional de Geología y Minería: 41 pp. Santiago. <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/25915> (acceso abril 2025).
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.** 2015. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras. Servicio Nacional de Geología y Minería: 248pp. Santiago. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/GuiaMetodologicaQuimica.pdf> (acceso abril 2025).
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.** 2023. Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile (03/2023). Subdirección de Minería, Departamento de Evaluación de Proyectos Mineros: 10 pp. Santiago. <http://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/> (acceso abril 2025).
- SGS.** 2023. Importancia de las pruebas de predicción de drenajes ácidos. <https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2023/10/importancia-pruebas-prediccion-drenajes-acidos> (acceso mayo 2025).
- SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J. & CROUCH, S.R.** 2008. Principios de análisis instrumental. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.: 1.063 pp. México, D.F.
- SOBEK, A.A.; SCHULLER, W.A.; FREEMAN, J.R. & SMITH, R.M.** 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils (EPA Report N° 600/2-78-054) Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency: 203 pp. Cincinnati, Ohio.
- STEWART, W.A.; MILLER, S.D. & SMART, R.** 2006. Use of the Net Acid Generation (NAG) test for evaluating and quantifying the acid generating capacity of sulphide minerals. Congreso Internacional sobre Drenaje Ácido de Rocas, N° 7. Tomo II: 2098-2119. Lexington, KY.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA).** 1992. Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846), Revisión 0. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA).** 1994. Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP). Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846), Revisión 0. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- VÁSQUEZ, O.Y.** 2016. Evaluación de un biorreactor pasivo durante la remediación de drenajes ácidos de mina del distrito minero de Zipaquirá (Colombia). Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias Biológicas. Pontificia Universidad Javeriana: 171 pp. Bogotá D.C.

<https://repository.javeriana.edu.co/items/6e7a3ada-14f8-474a-9e58-145310c45980> (acceso mayo 2025).

- VEGA, P.I.** 2021. Evaluación de metodologías para el escalamiento de pruebas de laboratorio para la predicción del potencial de generación de drenaje minero ácido en depósitos de estériles. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile: 84 pp. Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182036> (acceso mayo 2025).
- VILLANUEVA, D.E.** 2019. Metodología de caracterización geoquímica de residuos mineros aplicable en faena. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile: 116 pp. Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170594> (acceso junio 2025).
- VILLEGAS, G.A.** 2025. Implementación de pruebas estáticas para análisis de residuos mineros en materiales de relave. Trabajo de título para optar al título de Químico Analista. Universidad de Concepción (Inédito): 86 pp. Concepción.
- WAYBRANT, K.; BLOWES, D. & PTACEK, C.** 1998. Selection of reactive mixtures for use in permeable reactive walls for treatment of mine drainage. *Environmental Science & Technology*, Vol. **32** (13): 1972-1979.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos	Página
1. RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	71
2. RESULTADOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICOS POR QEMSCAN	74
2.1 Masa mineral y tamaño de grano (ESD)	74
2.2 Asociación mineral	81
2.3 Liberación de minerales seleccionados (pirita y calcita)	87
3. RESULTADOS DE PRUEBA ABCC	90

ANEXO 1. RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS (DRX).

Tabla 1. Minerales identificados por DRX en el relave Talcuna, agrupados por grupo mineralógico.

<i>Grupo mineralógico</i>	<i>Mineral</i>	<i>Relave Talcuna (%)</i>	<i>Tal-ABA (%)</i>	<i>Tal-NP (%)</i>	<i>Tal-SPLP (%)</i>
Sulfuros	Pirita	-	-	-	-
Carbonatos	Calcita	7,40	-	-	2,90
Sulfatos	Yeso	1,30	-	-	-
	Jarosita	-	-	-	-
	Butlerita	-	-	-	-
	Baritina	1,00	2,40	1,50	-
Óxidos de Fe/Al	Hematita	1,20	3,10	3,10	6,30
	Goethita	-	-	-	-
Silicatos	Cuarzo	-	-	-	-
	Albita	66,20	39,90	69,90	69,20
	Anortita	-	-	-	-
	Microclina	16,20	44,40	20,50	12,90
	Moscovita	-	-	-	-
	Biotita	-	4,30	-	-
	Clinocloro	3,30	2,90	1,40	6,00
	Analcima	3,40	3,10	3,50	2,60

Tabla 2. Minerales identificados por DRX en el relave Goethita, agrupados por grupo mineralógico.

<i>Grupo mineralógico</i>	<i>Mineral</i>	<i>Relave Goethita (%)</i>	<i>Goe-ABA (%)</i>	<i>Goe-NP (%)</i>	<i>Goe-SPLP (%)</i>
Sulfuros	Pirita	0,90	0,70	1,20	0,60
Carbonatos	Calcita	2,10	-	-	2,00
Sulfatos	Yeso	2,60	1,60	1,30	-
	Jarosita	-	-	-	-
	Butlerita	-	-	-	-
	Baritina	-	-	-	-
Óxidos de Fe/Al	Hematita	1,80	1,10	1,20	0,90
	Goethita	1,30	1,10	1,20	-
	Magnetita	-	-	-	2,60
Silicatos	Cuarzo	73,60	71,50	75,80	65,80
	Albita	4,70	9,80	8,60	6,70
	Anortita	-	-	-	-
	Microclina	4,90	3,60	3,20	2,40
	Moscovita	7,00	9,00	6,90	16,30
	Biotita	-	-	-	-
	Clinocloro	1,00	1,70	0,70	2,60
	Epidota	-	-	-	-
	Analcima	-	-	-	-

Tabla 3. Minerales identificados por DRX en el relave Jarosita, agrupados por grupo mineralógico.

<i>Grupo mineralógico</i>	<i>Mineral</i>	<i>Relave Jarosita (%)</i>	<i>Jar-ABA (%)</i>	<i>Jar-NP (%)</i>	<i>Jar-SPLP (%)</i>
<i>Sulfuros</i>	Pirita	1,10	4,90	2,40	1,30
<i>Carbonatos</i>	Calcita	-	-	-	-
<i>Sulfatos</i>	Yeso	5,10	3,70	-	-
	Jarosita	4,40	3,10	2,30	3,80
	Baritina	-	-	-	-
<i>Óxidos de Fe/Al</i>	Hematita	-	-	-	-
	Goethita	-	-	-	-
	Magnetita	2,40	2,70	2,70	1,50
<i>Silicatos</i>	Cuarzo	79,20	78,10	83,50	85,40
	Albita	-	-	-	-
	Anortita	-	-	-	-
	Microclina	-	-	-	-
	Moscovita	-	-	-	-
	Biotita	-	-	-	-
	Clinocloro	-	-	-	-
	Epidota	7,80	7,50	9,00	8,00
	Analcima	-	-	-	-
	Pirofilita	-	-	-	-
	Caolinita	-	-	-	-

Tabla 4. Minerales identificados por DRX en el relave Escondida, agrupados por grupo mineralógico.

<i>Grupo mineralógico</i>	<i>Mineral</i>	<i>Relave Escondida (%)</i>	<i>Esc-ABA (%)</i>	<i>Esc-NP (%)</i>	<i>Esc-SPLP (%)</i>
<i>Sulfuros</i>	Pirita	0,80	0,40	0,90	0,90
<i>Carbonatos</i>	Calcita	-	-	-	-
<i>Sulfatos</i>	Yeso	-	-	-	-
	Jarosita	-	-	-	-
	Butlerita	-	-	-	4,40
<i>Óxidos de Fe/Al</i>	Hematita	-	-	-	-
	Goethita	-	-	-	-
	Magnetita	-	-	-	-
<i>Silicatos</i>	Cuarzo	46,20	41,60	37,40	50,80
	Albita	10,40	17,00	18,10	15,00
	Anortita	12,10	12,80	13,80	-
	Microclina	-	-	-	-
	Moscovita	18,30	20,50	22,10	20,90
	Biotita	-	-	-	-
	Clinocloro	8,20	3,90	4,20	8,20
	Epidota	-	-	-	-
	Analcima	-	-	-	-
	Pirofilita	4,00	3,70	3,50	-
	Caolinita	-	-	-	-

Tabla 5. Minerales identificados por DRX en el relave DMH, agrupados por grupo mineralógico.

<i>Grupo mineralógico</i>	<i>Mineral</i>	<i>Relave DMH (%)</i>	<i>DMH-ABA (%)</i>	<i>DMH-NP (%)</i>	<i>DMH-SPLP (%)</i>
<i>Sulfuros</i>	Pirita	0,50	0,40	0,50	0,30
<i>Carbonatos</i>	Calcita	0,80	0,90	0,20	0,60
<i>Sulfatos</i>	Yeso	1,50	0,90	0,60	2,80
	Jarosita	-	-	-	-
	Butlerita	-	-	-	-
	Baritina	-	-	-	-
<i>Óxidos de Fe/Al</i>	Hematita	-	-	-	-
	Goethita	-	-	-	-
	Magnetita	-	-	-	-
<i>Silicatos</i>	Cuarzo	63,70	73,90	63,70	63,10
	Albita	-	-	-	-
	Anortita	-	-	-	-
	Microclina	2,70	10,60	8,30	6,60
	Moscovita	24,20	9,60	22,80	21,40
	Biotita	-	-	-	-
	Clinocloro	3,00	1,20	1,90	0,70
	Epidota	-	-	-	-
	Analcima	-	-	-	-
	Pirofilita	-	-	-	-
	Caolinita	3,60	2,50	2,00	4,50

ANEXO 2: RESULTADOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICOS POR QEMSCAN

Anexo 2.1: Masa mineral y tamaño de grano (ESD)

Tabla 6. Masa mineral y tamaño de grano efectivo para las muestras del relave Talcuna. Agrupadas por grupo mineralógico.

<i>Grupo Mineralógico</i>	<i>Minerales</i>	<i>Relave Talcuna</i>		<i>Tal-ABA</i>		<i>Tal-NP</i>		<i>Tal-SPLP</i>	
		<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>
<i>Sulfuros</i>	Calcopirita	0,12	14,63	0,04	8,98	0,06	8,12	0,03	7,47
	Pirita	0,02	9,45	0,03	7,93	0,02	9,47	0,05	8,12
	Calcosina - Digenita	0,01	7,68	0,01	8,26	0,01	7,40	0,01	8,16
	Covelina	0,00	13,69	0,01	11,07	0,01	9,77	0,00	7,14
	Molibdenita	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bornita	0,05	14,60	0,01	8,93	0,00	0,00	0,05	9,26
	Sulfuro de Cu-As (Enargita)	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Galena	0,00	12,12	0,01	10,71	0,00	9,52	0,01	7,79
	Esfalerita	0,01	27,61	0,01	8,81	0,00	7,14	0,00	7,14
	Total	0,21	116,92	0,12	64,69	0,10	51,42	0,15	55,08
	Promedio	0,02	12,99	0,01	7,19	0,01	5,71	0,02	6,12
<i>Carbonatos</i>	Calcita	4,62	26,77	0,02	9,87	0,02	7,85	0,87	9,05
<i>Sulfatos</i>	Baritina	0,83	17,77	0,53	9,11	0,26	9,37	0,13	8,48
	Jarosita	0,00	7,39	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	7,14
	Yeso	0,01	7,86	0,04	7,51	0,08	7,19	0,09	7,26
	Alunita	0,01	7,51	0,05	7,96	0,03	7,26	0,07	7,61
	Total	0,85	40,53	0,62	31,72	0,37	30,96	0,29	30,49
Promedio	1,09	13,46	0,13	8,32	0,08	7,76	0,23	7,91	
<i>Óxidos e Hidróxidos</i>	Limonita	1,36	9,02	1,69	8,32	1,50	7,66	1,42	7,56
	Goethita	0,15	9,33	0,16	8,28	0,19	7,88	0,13	7,36
	Magnetita-Hematita-Limonita	1,20	13,87	1,03	11,36	1,23	11,14	0,69	8,52
	Rutilo - Anatasa	1,58	9,17	2,66	8,08	2,44	7,75	1,16	7,57
	Corindón	0,01	9,58	0,05	11,44	0,15	11,20	0,09	10,32
	Total	4,30	50,97	5,59	47,48	5,51	45,63	3,49	41,33
	Promedio	0,86	10,19	1,12	9,50	1,10	9,13	0,70	8,27

Continuación de la Tabla 6.									
Silicatos	Cuarzo	1,65	7,91	3,89	9,39	5,69	7,59	5,82	7,69
	Feldespatos (Plagioclasa/K- Feldespatos)	56,94	30,06	44,13	14,76	61,16	13,22	44,38	11,01
	Moscovita	1,29	9,78	1,85	9,98	0,08	7,76	0,10	7,38
	Clorita	4,08	13,56	3,74	10,34	1,23	10,38	1,11	8,06
	Biotita - Filogopita	17,90	13,13	33,25	11,87	18,10	8,77	7,19	7,77
	Anfibol- Piróxeno	1,38	7,75	2,06	8,61	2,20	7,44	24,35	9,22
	Epidota	0,04	7,79	0,29	11,55	0,02	10,24	0,11	7,52
	'Caolinita' (arcilla)	0,11	7,31	0,14	7,26	0,06	7,14	0,29	7,17
	Zircón	0,00	10,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Titanita	0,74	11,53	1,04	10,92	1,95	9,37	1,48	8,40
	Serpentina	0,00	7,14	0,00	8,24	0,00	9,52	0,00	7,14
	Talco	0,00	15,93	0,02	7,82	0,00	7,14	0,01	17,29
	Fe-Olivina	0,01	7,14	0,02	7,14	0,06	7,18	0,01	7,14
	Granate	0,68	7,52	0,32	8,40	0,09	7,26	1,04	7,30
	Wollastonita	0,13	7,87	0,00	7,65	0,00	10,20	0,12	7,19
	Total	84,95	165,13	90,75	133,93	90,64	123,21	86,01	120,28
	Promedio	5,66	11,01	6,05	8,93	6,04	8,21	5,73	8,02
Otros Grupos	Acero	0,00	8,06	0,00	7,14	0,01	7,69	0,02	8,73
	Apatita	0,05	8,51	0,00	9,18	0,00	7,14	0,05	7,23
	Total	0,05	16,57	0,00	16,32	0,01	14,83	0,07	15,96
	Promedio	0,03	8,29	0,00	8,16	0,01	7,42	0,04	7,98
Otros		5,00	9,03	2,87	7,80	3,35	7,80	9,11	8,14

Tabla 7. Masa mineral y tamaño de grano efectivo para las muestras del relave Goethita. Agrupadas por grupo mineralógico.

Grupo Mineralógico	Minerales	Relave Goethita		Goe-ABA		Goe-NP		Goe-SPLP	
		<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>
Sulfuros	Calcopirita	0,06	19,43	0,03	10,46	0,03	11,82	0,04	9,45
	Pirita	2,54	32,41	1,32	11,73	1,19	10,95	0,86	8,73
	Calcosina - Digenita	0,00	8,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14
	Covelina	0,00	15,25	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	0,00
	Molibdenita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bornita	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sulfuro de Cu- As (Enargita)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Galena	0,09	12,40	0,03	7,84	0,04	8,09	0,13	8,73

Continuación de la Tabla 7.										
	Esfalerita	0,01	17,56	0,02	11,52	0,03	11,67	0,01	8,40	
	Total	2,70	112,92	1,40	48,69	1,29	49,67	1,04	42,45	
	Promedio	0,30	12,55	0,16	5,41	0,14	5,52	0,12	4,72	
Carbonatos	Calcita	1,74	25,75	0,04	7,72	0,02	8,16	1,04	9,68	
Sulfatos	Barita	0,01	17,85	0,00	10,71	0,00	8,44	0,01	7,79	
	Jarosita	0,37	11,40	0,66	7,33	0,70	7,34	0,47	7,33	
	Yeso	0,09	11,06	0,04	7,48	0,04	7,26	0,14	7,44	
	Alunita	0,05	11,02	0,04	7,98	0,20	9,54	0,14	7,91	
	Total	0,52	51,33	0,74	33,50	0,94	32,58	0,76	30,47	
	Promedio	0,45	15,42	0,16	8,24	0,19	8,15	0,36	8,03	
Óxidos e Hidróxidos	Limonita	8,25	12,01	15,70	8,55	15,74	8,53	10,51	8,22	
	Goethita	5,52	16,76	1,41	9,42	1,19	9,44	1,06	8,3	
	Magnetita-Hematita-Limonita	5,73	18,24	1,92	9,84	1,85	10,16	1,39	8,50	
	Rutilo - Anatasa	0,46	12,36	0,51	8,81	0,46	8,61	0,50	8,40	
	Corindón	0,02	11,80	0,11	13,93	0,06	10,29	0,12	11,29	
	Total	19,98	71,17	19,65	50,55	19,30	47,03	13,58	44,71	
	Promedio	4,00	14,23	3,93	10,11	3,86	9,41	2,72	8,94	
Silicatos	Cuarzo	54,98	58,03	47,12	13,02	47,38	13,39	43,60	12,39	
	Feldespatos (Plagioclasa/K-Feldespatos)	7,25	14,76	16,60	9,34	16,98	9,52	14,33	9,12	
	Moscovita	2,56	12,71	0,40	8,26	0,36	8,55	1,15	8,45	
	Clorita	1,34	17,29	0,53	9,47	0,44	8,60	1,07	8,99	
	Biotita - Filogopita	2,52	9,69	5,86	7,96	5,66	7,99	6,31	8,02	
	Anfibol-Piróxeno	0,96	9,42	1,79	7,73	1,78	7,64	7,75	8,06	
	Epidota	0,47	23,36	0,60	11,94	0,55	11,94	0,46	9,94	
	'Caolinita' (arcilla)	0,19	9,92	0,10	7,87	0,11	7,94	0,18	7,70	
	Zircón	0,00	8,67	0,00	7,93	0,01	11,65	0,01	7,14	
	Titanita	0,08	13,06	0,08	9,93	0,07	8,40	0,08	8,17	
	Serpentina	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	9,82	0,00	7,14	
	Talco	0,03	8,58	0,02	8,23	0,02	7,51	0,04	10,01	
	Fe-Olivina	0,20	7,38	0,46	7,20	0,55	7,21	0,33	7,26	
	Granate	0,38	9,12	0,41	8,33	0,41	8,93	0,61	7,44	
	Wollastonita	0,12	8,16	0,01	7,71	0,00	7,14	0,21	7,29	
		Total	71,08	217,29	73,98	132,06	74,32	136,23	76,13	127,12
		Promedio	4,74	14,49	4,93	8,80	4,95	9,08	5,08	8,47

Continuación de la Tabla 7.									
<i>Otros Grupos</i>	Acero	0,01	8,10	0,01	7,14	0,00	7,14	0,03	9,31
	Apatita	0,10	14,66	0,02	10,71	0,06	10,33	0,12	9,18
	Total	0,11	22,76	0,03	17,85	0,06	17,47	0,15	18,49
	Promedio	0,06	11,38	0,02	8,93	0,03	8,74	0,08	9,25
<i>Otros</i>		3,86	11,51	4,15	7,72	3,87	7,66	7,31	8,08

Tabla 8. Masa mineral y tamaño de grano efectivo para las muestras del relave Jarosita. Agrupadas por grupo mineralógico.

<i>Grupo Mineralógico</i>	<i>Minerales</i>	<i>Relave Jarosita</i>		<i>JAR-ABA</i>		<i>JAR-NP</i>		<i>JAR- SPLP</i>	
		<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>
<i>Sulfuros</i>	Calcopirita	0,01	16,53	0,04	14,99	0,01	9,11	0,02	9,34
	Pirita	3,88	12,83	4,62	12,96	4,55	13,00	4,33	10,16
	Calcosina - Digenita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	15,17
	Covelina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14
	Molibdenita	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	14,28
	Bornita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sulfuro de Cu-As (Enargita)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Galena	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	11,90	0,00	0,00
	Esfalerita	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	0,00
	Total	3,89	50,78	4,66	42,23	4,56	48,29	4,36	56,09
	Promedio	0,43	5,64	0,52	4,69	0,51	5,37	0,48	6,23
<i>Carbonatos</i>	Calcita	0,10	8,00	0,03	7,59	0,03	7,96	0,28	10,26
<i>Sulfatos</i>	Barita	0,01	23,03	0,00	8,57	0,00	8,03	0,00	10,00
	Jarosita	2,41	8,51	13,99	9,04	9,59	8,32	12,13	8,04
	Yeso	0,83	14,53	0,10	7,66	0,02	7,52	0,16	7,33
	Alunita	0,04	7,77	0,11	7,96	0,03	8,89	0,03	7,44
	Total	3,29	53,84	14,2	33,23	9,64	32,76	12,32	32,81
Promedio	0,68	12,37	2,85	8,16	1,93	8,14	2,52	8,61	
<i>Óxidos e Hidróxidos</i>	Limonita	5,74	9,55	20,21	9,42	27,01	10,12	15,22	8,27
	Goethita	2,74	12,22	1,59	8,35	1,28	8,36	1,55	8,34
	Magnetita-Hematita-Limonita	7,84	29,24	5,08	13,87	5,21	14,07	2,81	10,06
	Rutilo - Anatasa	0,06	11,68	0,12	8,49	0,11	7,67	0,13	8,40
	Corindón	0,06	9,74	0,20	9,67	0,04	10,40	0,09	8,76
	Total	16,44	72,43	27,20	49,8	33,65	50,62	19,8	43,83
	Promedio	3,29	14,49	5,44	9,96	6,73	10,12	3,96	8,77

Continuación de la Tabla 8.										
Silicatos	Cuarzo	61,50	93,27	35,46	15,18	35,85	15,67	34,92	12,71	
	Feldespatos (Plagioclasa/K- Feldespatos)	1,36	16,46	1,62	10,25	1,29	9,74	1,19	9,61	
	Moscovita	0,08	10,78	0,02	8,84	0,01	10,06	0,01	7,63	
	Clorita	0,06	17,04	0,11	9,90	0,11	9,99	0,12	9,18	
	Biotita - Filogopita	0,14	8,87	0,11	7,85	0,13	7,60	0,12	7,33	
	Anfibol- Piróxeno	0,52	9,93	3,06	7,95	3,26	7,91	3,63	7,71	
	Epidota	7,92	33,57	4,66	13,96	4,61	14,06	3,96	11,30	
	'Caolinita' (arcilla)	0,03	8,08	0,02	7,60	0,01	8,33	0,01	7,62	
	Zircón	0,00	7,93	0,01	12,30	0,01	13,01	0,00	8,03	
	Titanita	0,05	17,78	0,07	10,47	0,06	10,46	0,05	9,25	
	Serpentina	0,00	7,14	0,02	9,07	0,00	7,14	0,00	7,14	
	Talco	0,01	9,00	0,03	8,07	0,01	7,42	0,01	7,14	
	Fe-Olivina	0,16	7,42	0,29	7,19	0,49	7,21	0,28	7,22	
	Granate	0,70	8,99	0,46	9,94	0,46	9,67	0,41	8,13	
	Wollastonita	0,00	7,63	0,00	8,93	0,00	8,40	0,03	7,37	
	Total	72,53	263,89	45,94	147,50	46,30	146,67	44,74	127,37	
	Promedio	4,84	17,59	3,06	9,83	3,09	9,78	2,98	8,49	
	Otros Grupos	Acero	0,00	7,14	0,01	9,34	0,01	8,73	0,01	9,09
		Apatita	0,01	13,95	0,00	7,14	0,01	10,36	0,03	8,58
Total		0,01	21,09	0,01	16,48	0,02	19,09	0,04	17,67	
Promedio		0,01	10,55	0,01	8,24	0,01	9,55	0,02	8,84	
Otros		3,76	9,15	7,97	8,41	5,81	8,04	18,47	9,22	

Tabla 9. Masa mineral y tamaño de grano efectivo para las muestras del relave Escondida. Agrupadas por grupo mineralógico.

Grupo Mineralógico	Minerales	Relave Escondida		ESC-ABA		ESC-NP		ESC-SPLP	
		<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>
Sulfuros	Calcopirita	0,41	20,26	0,19	12,5	0,23	15,27	0,26	10,39
	Pirita	2,96	58,17	2,97	25,04	2,92	24,69	1,20	10,72
	Calcosina - Digenita	0,02	8,06	0,01	8,11	0,01	8,12	0,01	7,14
	Covelina	0,01	8,11	0,00	7,14	0,00	7,14	0,01	7,14
	Molibdenita	0,11	61,40	0,02	10,20	0,05	28,56	0,01	7,14
	Bornita	0,03	17,45	0,00	7,14	0,01	12,01	0,01	10,71
	Sulfuro de Cu- As (Enargita)	0,09	46,55	0,00	13,09	0,01	11,90	0,00	7,14
	Galena	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Esfalerita	0,00	11,90	0,00	10,71	0,01	38,38	0,00	7,14

Continuación de la Tabla 9.									
	Total	3,63	239,04	3,19	93,93	3,24	146,07	1,50	67,52
	Promedio	0,40	26,56	0,35	10,44	0,36	16,23	0,17	7,50
<i>Carbonatos</i>	Calcita	0,01	12,08	0,02	10,35	0,01	8,20	0,02	9,11
<i>Sulfatos</i>	Barita	0,00	15,3	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	Jarosita	0,02	7,83	0,02	7,14	0,02	7,24	0,02	7,14
	Yeso	0,04	8,56	0,04	7,94	0,05	7,36	0,05	7,34
	Alunita	0,19	8,14	0,12	7,24	0,19	7,65	0,24	7,31
	Total	0,25	39,83	0,18	29,46	0,26	22,25	0,31	21,79
	Promedio	0,05	10,38	0,04	7,96	0,05	6,09	0,07	6,18
<i>Óxidos e Hidróxidos</i>	Limonita	0,15	10,66	0,10	8,47	0,06	7,89	0,14	8,57
	Goethita	0,01	8,13	0,05	14,28	0,01	8,42	0,04	10,36
	Magnetita- Hematita- Limonita	0,30	9,87	0,18	8,81	0,17	9,12	0,26	8,08
	Rutilo - Anatasa	0,90	10,66	0,94	10,32	1,08	10,89	1,09	8,85
	Corindón	0,37	10,80	0,01	11,07	0,13	9,80	0,55	10,23
	Total	1,73	50,12	1,28	52,95	1,45	46,12	2,08	46,09
		Promedio	0,35	10,02	0,26	10,59	0,29	9,22	0,42
<i>Silicatos</i>	Cuarzo	38,09	29,54	39,23	21,34	40,55	22,12	32,08	13,98
	Feldespatos (Plagioclasa/K- Feldespatos)	26,42	14,25	26,73	12,34	25,99	12,14	31,26	9,94
	Moscovita	19,33	14,29	18,28	12,07	18,29	12,23	20,03	9,48
	Clorita	4,86	15,91	5,73	14,97	5,55	14,51	5,90	11,42
	Biotita - Filogopita	3,87	11,90	3,38	10,71	2,84	10,82	4,13	9,36
	Anfibol- Piróxeno	0,20	7,57	0,25	7,92	0,20	7,72	0,25	7,64
	Epidota	0,02	12,28	0,06	14,52	0,08	21,42	0,04	9,82
	'Caolinita' (arcilla)	0,40	8,87	0,52	8,95	0,50	8,76	0,65	8,18
	Zircón	0,01	8,93	0,01	8,16	0,01	7,88	0,01	7,14
	Titanita	0,01	8,70	0,01	8,40	0,01	8,38	0,01	8,93
	Serpentina	0,00	0,00	0,03	9,59	0,00	8,57	0,00	0,00
	Talco	0,03	7,44	0,05	8,71	0,03	7,45	0,03	9,28
	Fe-Olivina	0,00	7,79	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	0,00
	Granate	0,06	8,39	0,10	7,79	0,07	7,18	0,09	7,21
	Wollastonita	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	7,14	0,00	10,00
	Total	93,30	163,00	94,38	159,75	94,12	163,46	94,48	122,38
		Promedio	6,22	10,87	6,29	10,65	6,27	10,90	6,30

Continuación de la Tabla 9.									
<i>Otros Grupos</i>	Acero	0,02	12,71	0,02	8,76	0,04	10,96	0,03	7,93
	Apatita	0,21	16,12	0,02	8,59	0,01	8,16	0,24	10,93
	Total	0,23	28,83	0,04	17,35	0,05	19,12	0,27	18,86
	Promedio	0,12	14,42	0,02	8,68	0,03	9,56	0,14	9,43
<i>Otros</i>		0,83	8,12	0,90	7,97	0,86	8,16	1,32	8,25

Tabla 10. Masa mineral y tamaño de grano efectivo para las muestras del relave DMH. Agrupadas por grupo mineralógico.

<i>Grupo Mineralógico</i>	<i>Minerales</i>	<i>Relave DMH</i>		<i>DMH-ABA</i>		<i>DMH-NP</i>		<i>DMH-SPLP</i>	
		<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>	<i>Masa Mineral</i>	<i>Tamaño ESD (µm)</i>
<i>Sulfuros</i>	Calcopirita	0,70	32,38	0,32	11,81	0,5	16,99	0,28	8,43
	Pirita	0,65	34,11	0,73	16,08	0,70	17,65	0,63	10,18
	Calcosina - Digenita	0,26	29,78	0,02	7,14	0,01	7,34	0,05	7,14
	Covelina	0,01	7,34	0,01	10,31	0,03	15,07	0,00	7,14
	Molibdenita	0,00	7,14	0,01	8,03	0,01	8,93	0,02	11,60
	Bornita	0,09	12,75	0,01	12,14	0,06	24,2	0,01	7,14
	Sulfuro de Cu-As (Enargita)	0,00	8,73	0,00	9,52	0,00	8,93	0,00	7,14
	Galena	0,01	9,18	0,01	7,14	0,01	11,90	0,01	7,14
	Esfalerita	0,02	13,57	0,07	12,46	0,08	18,11	0,06	11,75
	Total	1,74	154,98	1,18	94,63	1,40	129,12	1,06	77,66
Promedio	0,19	17,22	0,13	10,51	0,16	14,35	0,12	8,63	
<i>Carbonatos</i>	Calcita	0,30	14,37	0,01	9,11	0,02	9,76	0,20	10,69
<i>Sulfatos</i>	Barita	0,02	14,97	0,01	9,52	0,01	11,11	0,03	7,54
	Jarosita	0,01	7,23	0,02	7,14	0,00	7,14	0,03	7,14
	Yeso	0,14	8,12	0,13	7,66	0,11	7,51	0,29	7,25
	Alunita	0,61	9,87	0,41	8,72	0,36	9,65	1,04	7,46
	Total	0,78	40,19	0,57	33,04	0,48	35,41	1,39	29,39
Promedio	0,22	10,91	0,12	8,43	0,10	9,03	0,32	8,02	
<i>Óxidos e Hidróxidos</i>	Limonita	0,40	8,88	0,27	9,08	0,17	8,09	0,46	7,67
	Goethita	0,04	8,62	0,06	10,10	0,04	8,36	0,05	7,34
	Magnetita-Hematita-Limonita	0,23	8,64	0,37	7,89	0,30	8,05	0,70	7,38
	Rutilo - Anatasa	0,68	11,39	0,86	10,43	0,68	9,62	1,22	7,91
	Corindón	0,62	10,73	0,02	10,93	0,02	9,68	0,11	9,07
	Total	1,97	48,26	1,58	48,43	1,21	43,80	2,54	39,37
	Promedio	0,39	9,65	0,32	9,69	0,24	8,76	0,51	7,87

Continuación de la Tabla 10.									
Silicatos	Cuarzo	54,97	40,85	56,36	19,34	58,87	20,03	27,89	10,05
	Feldespatos (Plagioclasa/K- Feldespatos)	18,08	12,12	21,46	9,94	20,15	10,08	39,89	8,69
	Moscovita	15,90	13,66	15,28	10,89	15,01	10,73	18,97	8,23
	Clorita	0,55	11,79	0,66	10,75	0,57	10,67	0,60	8,92
	Biotita - Filogopita	1,02	8,31	1,12	8,16	0,81	8,18	3,01	7,40
	Anfibol- Piróxeno	0,10	7,47	0,09	7,81	0,07	8,27	0,19	7,32
	Epidota	0,01	9,36	0,01	9,28	0,00	7,14	0,01	7,14
	'Caolinita' (arcilla)	0,63	12,24	0,50	9,89	0,54	9,16	0,63	7,76
	Zircón	0,01	9,64	0,03	15,77	0,02	16,36	0,02	8,93
	Titanita	0,00	7,89	0,00	7,14	0,00	7,14	0,04	10,98
	Serpentina	0,00	18,25	0,03	8,81	0,00	0,00	0,00	0,00
	Talco	0,01	7,77	0,04	12,87	0,00	7,14	0,00	7,14
	Fe-Olivina	0,00	7,62	0,01	7,14	0,01	7,14	0,00	7,14
	Granate	0,07	7,39	0,06	10,04	0,03	7,60	0,07	7,14
	Wollastonita	0,01	7,87	0,01	10,12	0,00	8,33	0,02	8,27
	Total	91,36	182,23	95,66	157,95	96,08	137,97	91,34	115,11
	Promedio	6,09	12,15	6,38	10,53	6,41	9,20	6,09	7,67
Otros Grupos	Acero	0,07	17,57	0,03	14,66	0,02	8,63	0,04	8,03
	Apatita	0,13	12,24	0,01	7,14	0,02	8,42	0,13	8,42
	Total	0,20	29,81	0,04	21,80	0,04	17,05	0,13	16,45
	Promedio	0,10	14,91	0,02	10,90	0,02	8,53	0,09	8,23
Otros		3,63	15,20	0,96	9,01	0,75	8,59	3,31	8,36

Anexo 2.2: Asociación mineral

Tabla 11. Asociación mineralógica de pirita y calcita en las muestras del relave Talcuna.

Minerales	Relave Talcuna		TAL-ABA		TAL-NP		TAL-SPLP	
	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita
Fondo	0,05	5,93	0,04	0,04	0,02	0,03	0,06	1,38
Cuarzo	0,01	0,19	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
Feldespatos (Plagioclasa -Feldespatos potásicos)	0,01	0,72	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
Moscovita	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Clorita	0,00	0,25	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,23
Biotita - Filogopita	0,01	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Anfibol - Piróxeno	0,00	1,70	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,34

Continuación Tabla 11.								
<i>Epidota</i>	0,00	9,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
<i>Calcita</i>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Baritina</i>	0,04	3,59	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>'Caolinita' (arcilla)</i>	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
<i>Alunita</i>	1,04	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Yeso</i>	0,76	4,17	0,15	0,00	0,00	0,00	0,16	0,48
<i>Calcopirita</i>	0,92	4,56	1,20	0,00	0,00	0,00	1,15	0,00
<i>Pirita</i>	0,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Calcosina - Digenita</i>	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Covelina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Bornita</i>	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Limonita</i>	0,03	0,28	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,17
<i>Goethita</i>	0,22	0,44	0,12	0,19	0,26	0,35	0,17	0,17
<i>Jarosita</i>	3,45	0,00	0,00	0,00	10,0	0,00	0,00	0,00
<i>Magnetita-Hematita-Limonita</i>	0,06	1,72	0,11	0,20	0,09	0,31	0,00	0,15
<i>Galena</i>	0,00	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Esfalerita</i>	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Corindón</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Titanita</i>	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
<i>Rutilo - Anatasa</i>	0,01	1,24	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,13
<i>Apatita</i>	0,00	5,61	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,32
<i>Acero</i>	0,00	2,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Serpentina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Talco</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Fe-Olivino</i>	0,00	0,49	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00
<i>Granate</i>	0,00	11,66	0,00	0,03	0,00	0,17	0,00	1,91
<i>Wollastonita</i>	0,00	34,49	0,00	14,29	0,00	0,00	0,00	8,84
<i>Otro</i>	0,02	13,38	0,09	0,05	0,02	0,05	0,03	1,42

Tabla 12. Asociación mineralógica de pirita y calcita en las muestras del relave Goethita.

<i>Minerales</i>	<i>Relave Goethita</i>		<i>GOE-ABA</i>		<i>GOE-NP</i>		<i>GOE-SPLP</i>	
	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>
<i>Fondo</i>	1,25	2,17	0,79	0,06	0,76	0,03	0,65	1,40
<i>Cuarzo</i>	0,08	0,08	0,12	0,00	0,14	0,00	0,09	0,08
<i>Feldespatos (Plagioclasa - Feldespatos potásicos)</i>	0,25	0,22	0,20	0,01	0,22	0,00	0,17	0,12
<i>Moscovita</i>	0,08	0,04	0,10	0,00	0,27	0,00	0,10	0,05
<i>Clorita</i>	0,05	0,11	0,14	0,03	0,05	0,00	0,02	0,08
<i>Biotita - Filogopita</i>	0,21	0,03	0,20	0,00	0,20	0,00	0,16	0,03

Continuación de la Tabla 12.								
<i>Anfibol-Piróxeno</i>	0,12	1,22	0,19	0,00	0,20	0,00	0,14	0,53
<i>Epidota</i>	0,00	0,37	0,08	0,00	0,12	0,00	0,00	0,27
<i>Calcita</i>	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00
<i>Barita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>'Caolinita' (arcilla)</i>	0,18	0,05	0,12	0,00	0,27	0,00	0,28	0,00
<i>Alunita</i>	4,31	0,08	0,88	0,00	0,53	0,00	0,66	0,00
<i>Yeso</i>	0,51	0,48	0,68	0,00	0,54	0,00	0,75	0,38
<i>Calcopirita</i>	3,53	0,39	0,00	0,00	1,64	0,00	0,77	0,00
<i>Pirita</i>	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
<i>Calcosina - Digenita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Covelina</i>	0,00	0,00	0,22	0,04	0,25	0,02	0,21	0,11
<i>Limonita</i>	0,58	0,31	0,26	0,36	0,32	0,10	0,42	0,17
<i>Goethita</i>	0,97	0,69	3,26	0,02	3,88	0,00	2,79	0,00
<i>Jarosita</i>	15,55	0,01	0,23	0,38	0,35	0,21	0,34	0,12
<i>Magnetita-Hematita-Limonita</i>	0,74	0,69	11,76	0,00	2,00	0,00	3,42	0,00
<i>Galena</i>	14,23	0,13	3,23	0,00	3,97	0,00	0,00	0,00
<i>Esfalerita</i>	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Corindón</i>	0,00	0,36	0,00	0,00	0,09	0,09	0,00	0,00
<i>Titanita</i>	0,00	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rutilo - Anatasa</i>	0,31	0,11	0,28	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
<i>Apatita</i>	0,13	2,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
<i>Acero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Serpentina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Talco</i>	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Fe-Olivino</i>	0,11	0,07	0,16	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08
<i>Granate</i>	0,07	3,17	0,14	0,05	0,17	0,00	0,12	1,18
<i>Wollastonita</i>	0,03	33,38	0,00	14,00	0,00	0,00	0,00	10,74
<i>Otro</i>	3,38	6,87	1,38	0,04	1,25	0,02	0,62	1,48

Tabla 13. Asociación mineralógica de pirita y calcita en las muestras del relave Jarosita.

Minerales	Relave Jarosita		JAR-ABA		JAR-NP		JAR-SLP	
	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita	Pirita	Calcita
<i>Fondo</i>	6,27	0,22	3,17	0,05	3,13	0,06	3,01	0,41
<i>Cuarzo</i>	0,22	0,02	0,39	0,00	0,48	0,00	0,38	0,02
<i>Feldespatos (Plagioclasa - Feldespatos potásicos)</i>	0,98	0,08	0,58	0,02	0,73	0,01	0,37	0,02
<i>Moscovita</i>	0,68	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00
<i>Clorita</i>	0,30	0,00	0,56	0,00	0,94	0,00	0,37	0,00
<i>Biotita - Filogopita</i>	1,13	0,02	0,55	0,00	0,39	0,00	0,56	0,00
<i>Anfibol - Piróxeno</i>	0,45	0,01	0,52	0,00	0,59	0,00	0,42	0,07

Continuación de la Tabla 14.								
<i>Barita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>'Caolinita' (arcilla)</i>	0,02	0,00	0,08	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
<i>Alunita</i>	1,46	0,00	2,55	0,00	1,57	0,00	1,46	0,00
<i>Yeso</i>	0,59	0,00	0,30	0,00	0,67	0,00	0,69	0,00
<i>Calcopirita</i>	10,52	0,00	7,14	0,00	4,14	0,00	0,50	0,00
<i>Pirita</i>	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Calcosina/Digenita</i>	1,28	0,00	4,55	0,00	3,45	0,00	0,00	0,00
<i>Covelina</i>	0,00	0,00	5,00	0,00	20,0	0,00	0,00	0,00
<i>Molibdenita</i>	5,45	0,00	1,79	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00
<i>Bornita</i>	15,08	0,00	25,00	0,00	6,82	0,00	0,00	0,00
<i>Cu-As-sulfuro (Enargita)</i>	0,00	0,00	25,00	0,00	5,56	0,00	0,00	0,00
<i>Limonita</i>	0,64	0,21	0,18	0,00	0,28	0,00	0,32	0,00
<i>Goethita</i>	1,54	1,54	0,76	0,00	0,00	0,00	1,61	0,00
<i>Jarosita</i>	7,77	0,00	0,67	0,00	7,04	0,00	0,00	0,00
<i>Magnetita-Hematita-Limonita</i>	1,90	0,23	1,63	0,13	1,04	0,00	0,37	0,00
<i>Esfalerita</i>	4,17	0,00	100,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Zirconio</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Corindón</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Titanita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rutilo/Anatasa</i>	0,60	0,00	0,30	0,00	0,47	0,00	0,13	0,00
<i>Apatita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Acero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Serpentina</i>	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Talco</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Fe-Olivino</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Granate</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Wollastonita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,11	0,00	0,00
<i>Otro</i>	3,44	0,10	2,77	0,19	2,37	0,02	1,00	0,09

Tabla 15. Asociación mineralógica de pirita y calcita en las muestras del relave DMH.

<i>Minerales</i>	<i>Relave DMH</i>		<i>DMH-ABA</i>		<i>DMH-NP</i>		<i>DMH-SPLP</i>	
	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>	<i>Pirita</i>	<i>Calcita</i>
<i>Fondo</i>	0,28	0,25	0,37	0,02	0,35	0,04	0,29	0,18
<i>Cuarzo</i>	0,02	0,01	0,04	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00
<i>Feldespatos (Plagioclasa-Feldespatos potásicos)</i>	0,03	0,01	0,06	0,00	0,06	0,00	0,08	0,00
<i>Moscovita</i>	0,03	0,00	0,06	0,00	0,05	0,00	0,08	0,00
<i>Clorita</i>	0,05	0,00	0,03	0,00	0,07	0,00	0,09	0,00

Continuación de la Tabla 15.								
<i>Biotita-Filogopita</i>	0,10	0,02	0,14	0,00	0,17	0,00	0,17	0,02
<i>Anfibol-Piróxeno</i>	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Epidota</i>	0,00	4,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Calcita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Barita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>'Caolinita' (arcilla)</i>	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Alunita</i>	0,16	0,01	0,83	0,00	1,09	0,00	0,48	0,00
<i>Yeso</i>	0,05	0,05	0,13	0,00	0,28	0,14	0,31	0,00
<i>Calcopirita</i>	7,21	0,06	1,39	0,00	1,07	0,00	1,30	0,00
<i>Pirita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Calcosina-Digenita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	0,00
<i>Covelina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Molibdenita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Bornita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00
<i>Cu-As-sulfuro (Enargita)</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Limonita</i>	0,19	0,21	0,27	0,18	0,46	0,00	0,84	0,00
<i>Goethita</i>	0,00	0,52	1,06	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00
<i>Jarosita</i>	1,81	0,00	2,73	0,00	0,00	0,00	2,08	0,00
<i>Magnetita-Hematita- Limonita</i>	1,73	0,09	0,46	0,00	0,37	0,00	0,50	0,00
<i>Galena</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Esfalerita</i>	2,86	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Zirconio</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Corindón</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Titanita</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rutilo-Anatasa</i>	0,04	0,00	0,03	0,00	0,07	0,00	0,05	0,00
<i>Apatita</i>	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85
<i>Acero</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Serpentina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Talco</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Fe-Olivino</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Granate</i>	0,00	4,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82
<i>Wollastonita</i>	0,00	28,81	0,00	4,17	0,00	16,67	0,00	0,00
<i>Otro</i>	0,45	6,12	1,54	0,16	1,58	0,54	0,30	0,46

Anexo 2.3: Liberación de minerales seleccionados (pirita y calcita)

Tabla 16. Porcentaje relativo de liberación de pirita en muestras de Talcuna bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Talcuna</i>	<i>Tal-ABA</i>	<i>Tal-NP</i>	<i>Tal-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	100,00%	66,67%	50,00%	16,67%
<i>Moderadamente ocluida (30-70%)</i>	0,00%	0,00%	0,00%	16,67%
<i>Liberada (≥70%)</i>	0,00%	33,33%	50,00%	66,67%

Tabla 17. Porcentaje relativo de liberación de calcita en muestras de Talcuna bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de Liberación</i>	<i>Relave Talcuna</i>	<i>Tal-ABA</i>	<i>Tal-NP</i>	<i>Tal-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	21,81 %	50,00 %	0,00 %	39,08 %
<i>Moderadamente ocluida (30-<70%)</i>	23,95 %	0,00 %	0,00 %	14,95 %
<i>Liberada (≥70%)</i>	54,24 %	50,00 %	100,00 %	45,98 %

Tabla 18. Porcentaje relativo de liberación de pirita en muestras de Goethita bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Goethita</i>	<i>Goe-ABA</i>	<i>Goe-NP</i>	<i>Goe-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	10,20%	44,03%	50,42%	40,23%
<i>Moderadamente ocluida (30-70%)</i>	7,84%	6,72%	6,72%	11,49%
<i>Liberada (≥70%)</i>	81,96%	49,25%	42,86%	48,28%

Tabla 19. Porcentaje relativo de liberación de calcita en muestras de Goethita bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de Liberación</i>	<i>Relave Goethita</i>	<i>Goe-ABA</i>	<i>Goe-NP</i>	<i>Goe-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	12,71%	75,00%	50,00%	28,16%
<i>Moderadamente ocluida (30-<70%)</i>	14,45%	0,00%	0,00%	11,63%
<i>Liberada (≥70%)</i>	72,84%	25,00%	50,00%	60,19%

Tabla 20. Porcentaje relativo de liberación de pirita en muestras de Jarosita bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Jarosita</i>	<i>Jar-ABA</i>	<i>Jar-NP</i>	<i>Jar-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	35,05%	40,04%	48,90%	51,96%
<i>Moderadamente ocluida (30-70%)</i>	25,00%	6,71%	5,06%	8,31%
<i>Liberada (≥70%)</i>	39,95%	53,25%	46,04%	39,71%

Tabla 21. Porcentaje relativo de liberación de calcita en muestras de Jarosita bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Jarosita</i>	<i>Jar-ABA</i>	<i>Jar-NP</i>	<i>Jar-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	100,00%	66,67%	66,67%	39,29%
<i>Moderadamente ocluida (30-<70%)</i>	0,00%	0,00%	0,00%	10,71%
<i>Liberada (≥70%)</i>	0,00%	33,33%	33,33%	50,00%

Tabla 22. Porcentaje relativo de liberación de pirita en muestras de Escondida bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Escondida</i>	<i>Esc-ABA</i>	<i>Esc-NP</i>	<i>Esc-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	7,07%	4,36%	4,81%	7,44%
<i>Moderadamente ocluida (30-70%)</i>	2,37%	3,69%	3,08%	12,40%
<i>Liberada (≥70%)</i>	90,58%	91,95%	92,10%	80,16%

Tabla 23. Porcentaje relativo de liberación de calcita en muestras de Escondida bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de liberación</i>	<i>Relave Escondida</i>	<i>Esc-ABA</i>	<i>Esc-NP</i>	<i>Esc-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	–	0,00%	–	0,00%
<i>Moderadamente ocluida (30-<70%)</i>	–	0,00%	–	0,00%
<i>Liberada (≥70%)</i>	–	100,00%	–	100,00%

Tabla 24. Porcentaje relativo de liberación de pirita en muestras de DMH bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de Liberación</i>	<i>Relave DMH</i>	<i>DMH-ABA</i>	<i>DMH-NP</i>	<i>DMH-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	6,25%	12,00%	10,29%	18,75%
<i>Moderadamente ocluida (30-<70%)</i>	26,56%	9,33%	4,41%	20,31%
<i>Liberada (≥70%)</i>	67,19%	78,67%	85,29%	60,94%

Tabla 25. Porcentaje relativo de liberación de calcita en muestras de DMH bajo distintos tratamientos, según clases de liberación.

<i>Clase de Liberación</i>	<i>Relave DMH</i>	<i>DMH-ABA</i>	<i>DMH-NP</i>	<i>DMH-SPLP</i>
<i>Ocluida (<30%)</i>	50,00%	–	0,00	5,26%
<i>Moderadamente ocluida (30-70%)</i>	23,34%	–	0,00	10,53%
<i>Liberada (≥70%)</i>	26,66%	–	100,00%	84,21%

Anexo 3: RESULTADOS DE PRUEBA ABCC

Figura 1. Curva de amortiguación de la prueba ABCC del Relave Goethita. Modificado de Villegas Ramírez, (2025).

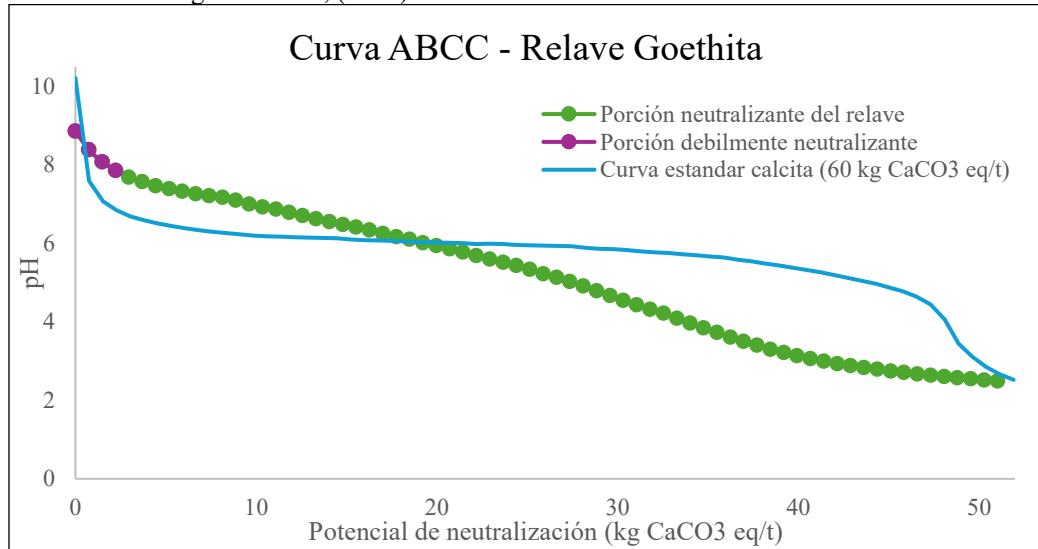


Figura 2. Curva de amortiguación de la prueba ABCC del Relave Escondida. Modificado de Villegas Ramírez, (2025).

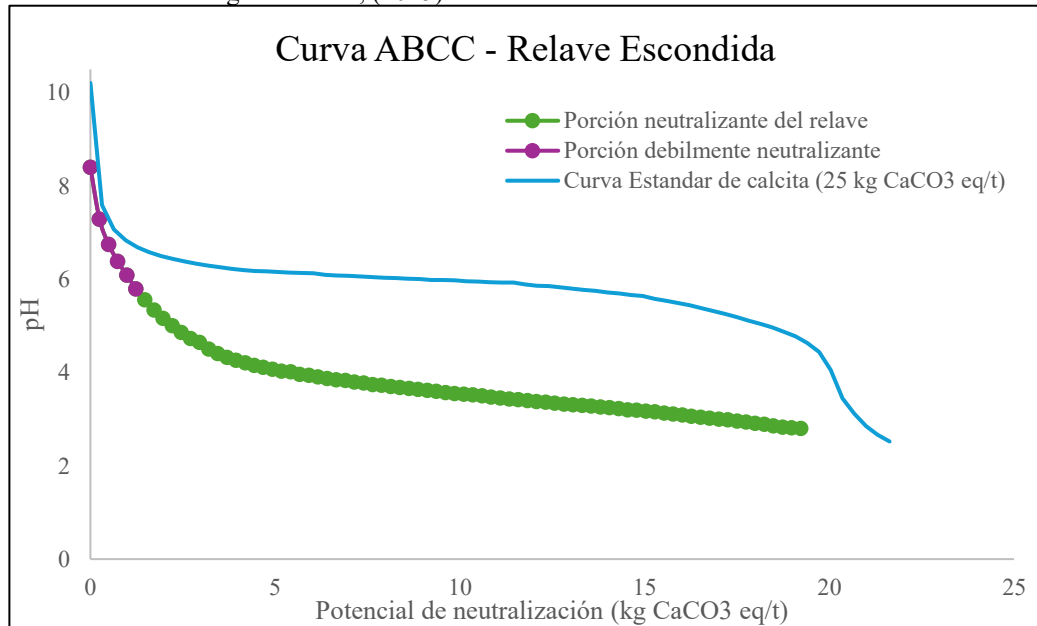


Figura 3. Curva de amortiguación de la prueba ABCC del Relave DMH. Modificado de Villegas Ramírez, (2025).

